

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
Імені адмірала Макарова

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису
Боднарчук Юлія Сергіївна

ДИСЕРТАЦІЯ

УДК 629.5.01

**ЗМЕНШЕННЯ ОПОРУ РУХУ СУДЕН ЗА ДОПОМОГОЮ ВИКОРИСТАННЯ
ВИЇМОК ТА ПОВІТРЯНОГО ЗМАЩЕННЯ**

05.08.03 – Конструювання та будування суден
Технічні науки

Подається для здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Боднарчук Ю.С.

Науковий керівник (консультант)

Король Юрій Михайлович
канд. техн. наук, доцент

Миколаїв 2021

АНОТАЦІЯ

Боднарчук Ю. С. Зменшення опору руху суден за допомогою використання виїмок та повітряного змащення – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.03 «Конструювання та будування суден» – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2021 р.

В дисертаційному дослідженні представлені засоби зниження опору судна у вигляді локальних поперечних поглиблень (виїмок) на днищовій поверхні різних типів суден та поглиблень (виїмок) у вигляді кілець на поверхні підводних човнів, а також вплив подачі повітряного мастила природним шляхом на поверхню швидкісного судна. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел.

В роботі описаний алгоритм побудови розрахункових проектів в computational fluid dynamics комплексах Flow Vision та Flow Simulation. Підчас створення розрахункового проекту виконується параметричний аналіз за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки. Визначаються параметри моделювання для того щоб працював алгоритм диференціальних рівнянь, які описують рух рідини, метод кінцевих об'ємів зводить їх до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Процес валідації програмного продукту Flow Vision та Flow Simulation при моделюванні обтікання корпусів суден виконувався для моделі танкеру проекту 005RST01 та підводного об'єкту сигаро подібної форми в різних науково-дослідницьких басейнах. Порівняння результатів розрахунків у вказаних програмних комплексах з даними фізичних експериментів показали дуже високу інформативність і достатню для практичного використання точність цих програм.

Також в роботі описується процес дослідження впливу виїмок на відносно простих об'єктах, таких як циліндричне тіло та круговий циліндр, які є перехідними етапами до судна та підводного човна відповідно. Проводилося дослідження ефективності локального поперечного поглиблення (виїмок) на днищовій поверхні

суховантажного судна. Перевірка ефективності впливу виїмок на ходові якості судна була виконана на моделі танкера проекту 005RST01. Окрім того, за допомогою computational fluid dynamics пакетів було виконано моделювання як для моделі, так і для натурного судна. Слід відмітити, що розміри і місце розташування виїмок для кожного судна необхідно підбирати окремо, беручи до уваги характеристики обраного натурного судна. В програмних продуктах Flow Vision та Flow Simulation проводилися розрахунки впливу встановлених виїмок на поверхнях двох типів підводних човнів.

Проведено дослідження методів зниження опору для швидкісних суден. В програмному комплексі Flow Vision моделювалось швидкісне судно зі встановленою виїмкою в двох варіантах: без урахування вільної поверхні і з урахуванням вільної поверхні для скорочення часу розрахунку і більш детального вивчення ефекту. На моделі погано обтічного тіла, у вигляді паралелепіпеду, досліджувалось питання про ступінь ефективності одночасного використання декількох засобів впливу на прикордонний шар спрямованих на зниження опору тіл при їх русі в рідині. На моделі швидкісного судна досліджується вплив на зниження опору подачі повітря на днищову поверхню корпусу через канали при заданій швидкості та за рахунок перепаду тиску на дні судна та атмосферного тиску зверху, що дало позитивний результат.

Сформована загальна схема алгоритму вибору засобів зниження опору руху під час проектування суден, які дають змогу зменшенню витрат палива і вартості перевезеного вантажу (пасажирів) та терміну окупності витрат при впровадженні цих засобів на новому або вже введеному в експлуатацію.

Розроблено методику визначення можливості зниження опору руху об'єктів океанотехніки з встановленими місцевими особливостями в основу якої покладені методи обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу.

Ключові слова: прикордонний шар, виїмка, повітряне змащення, судна, підводний човен, мінімізація опору, експериментальне і чисельне моделювання, параметричний аналіз, обчислювальна гідродинаміка, погано обтічне тіло.

ABSTRACT

Bodnarchuk J. S. Reducing ship drag through the use of recesses and air lubrication - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.08.03 "Design and construction of ships" - National university of shipbuilding of a name of Admiral Makarov, Nikolaev, 2021.

The dissertation research presents the means of reducing the resistance of the vessel in the form of local transverse depressions on the bottom surface of different types of vessels and depressions in the form of rings on the surface of submarines, as well as the effect of air oil on the surface of the speedboat. The dissertation consists of an introduction, three sections, conclusions, a list of used sources and appendices.

The paper describes an algorithm for constructing computational projects in computational fluid dynamics complexes Flow Vision and Flow Simulation. During the creation of the computational project, parametric analysis is performed using computational fluid dynamics methods. The modeling parameters are determined in order for the algorithm of differential equations describing the motion of a fluid to work, the method of finite volumes, which reduces them to a system of linear algebraic equations. The process of validation of the software product Flow Vision and Flow Simulation in modeling the flow around the hulls of ships was carried out for a model tanker of project 005RST01 and an underwater cigar-shaped object in various research basins. Comparison of the results of calculations in the indicated software complexes with the data of physical experiments showed a very high information content and the accuracy of these programs sufficient for practical use.

The paper also describes the process of studying the effect of excavations on relatively simple objects, such as a cylindrical body and a circular cylinder, which are transitional

stages to a ship and a submarine, respectively. A study of the effectiveness of the local transverse recess (recesses) on the bottom surface of the bulk carrier was carried out. Checking the effectiveness of the impact of excavations on the ship's sailing performance was carried out on a model tanker of project 005RST01. In addition, using computational fluid dynamics packages, simulations were performed for both the model and the full-scale vessel. It should be noted that the size and location of the recesses for each vessel must be selected separately, taking into account the characteristics of the selected full-scale vessel. In software products Flow Vision and Flow Simulation, calculations were made of the effect of installed cuts on the surfaces of two types of submarines.

A study of methods for reducing drag for high-speed vessels has been carried out. In the software package Flow Vision, a high-speed vessel with an installed recess was modeled in two versions: without taking into account, the free surface and taking into account the free surface to reduce the calculation time and study the effect in more detail. On the model of a bluff body, in the form of a parallelepiped, the question of the degree of efficiency of the simultaneous use of several means of influencing the boundary layer aimed at reducing the resistance of bodies when they move in a fluid was investigated. On the model of a high-speed vessel, the influence on the reduction of resistance when air is supplied to the bottom surface of the hull through the channels, at a given speed, due to the pressure drop at the bottom of the vessel and atmospheric pressure from above, is investigated, which gave a positive result.

The general scheme of the algorithm for choosing the means of reducing the resistance to movement in the design of ships has been developed, which allows reducing the fuel consumption and the cost of the transported cargo (passengers), as well as the payback period when these funds are introduced on a new or already commissioned ship.

A method has been developed for determining the possibility of reducing the resistance to movement of objects of ocean engineering with established local characteristics as a basis, which is based on the methods of computational fluid dynamics and parametric analysis.

Key words: boundary layer, excavation, air oil, vessels, submarine, resistance minimization, experimental and numerical modeling, computational hydrodynamics, applications and poorly streamlined body.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

основні наукові професійні видання

1. Боднарчук Ю. С., (2013), Влияние лунок на аэрогидродинамическое сопротивление пластины, шара и кругового цилиндра / Ю. С. Боднарчук// Вісник НУК імені адмірала Макарова, №4, С. 7-13.

2. Боднарчук Ю. С., (2013), Эффективность кормовой профилированной выемки для снижения сопротивления воды движению судна / Ю. М. Король, Ю. С. Боднарчук// Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування, №4, С.21-24. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

3. Bodnarchuk J. S., (2018), Stern profiled recess efficiency for reducing the water resistance of high-speed vessels / J. S. Bodnarchuk, Y. M. Korol// Shipbuilding and marine infrastructure, No.2 – pp. 107-110. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

4. Bodnarchuk J. S., (2019), Reducing poorly streamlined body water resistance by using active boundary layer control devices / J. S. Bodnarchuk // Shipbuilding and marine infrastructure, No.1 (11), pp. 4- 8.

5. Боднарчук Ю. С., (2019), Розрахунок опору різної форми ватерлінії та ватерлінії зі встановленими виїмками на її поверхні методами обчислюваної гідродинаміки / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VII (24), pp-49-52. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

6. Боднарчук Ю. С., (2020), Study of the influence of recesses on the resistance to the motion of submarines by methods of computational hydrodynamics/ Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король, М. І. Мунесан// Східно-Європейський журнал передових технологій, №5 (107), pp.2-22. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

Патенти

Пат. на корисну модель №134146 Україна, МПК F15D 1/00 B63B 3/14 Спосіб регулювання розподілу тиску на змоченій поверхні судна. Боднарчук Ю.С., Король Ю.М. Бюлетень №9 від 10.05.2019 – **авторський вклад**: розробка та дослідження виїмок на змоченій поверхні судна.

Результати дисертаційної роботи докладалися й отримали позитивну оцінку на наступних науково-технічних конференціях:

1. Боднарчук Ю. С., (2013), Ефект лунки та її вплив на опір пласкої пластини / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// V науково-практична конференція всеукраїнського конкурсу наукових робіт – Миколаїв, С. 7-9. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

2. Боднарчук Ю. С., (2013), Моделирование активного управления пограничным слоем в CFD пакете Flow Vision / Ю. С. Боднарчук// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю – Миколаїв, С. 50-51.

3. Боднарчук Ю. С., (2013), Исследование эффективности кормовой профилированной выемки для снижения сопротивления судна / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// IV міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 405-406. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків та співставлення отриманих розрахунків)*

4. Боднарчук Ю. С., (2014), Снижение вязкостных составляющих сопротивления судна при помощи кормовых профилированных выемок / Ю. С. Боднарчук, Ю. М.

Король// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю – Миколаїв, С. 8-9. *(здобувачу належить CFD моделювання руху судна з встановленими виїмками та параметричний аналіз характеристик виїмки)*

5. Боднарчук Ю. С., (2014), Зниження опору руху тіла за допомогою пристроїв активного керування прикордонним шаром / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// V міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 384-385. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків та співставлення отриманих розрахунків)*

6. Боднарчук Ю. С., (2018), CFD технологии в проблемах совершенствования элементов движительно-рулевого комплекса/ Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю– Миколаїв, С. 5-9. *(здобувачу належить розрахунки руху судна з встановленими виїмками)*

7. Боднарчук Ю. С., (2018), Влияние локального регулятора распределения давления на различных поверхностях /Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// IX міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 319-320. *(здобувачу належить CFD моделювання впливу виїмки на різних поверхнях)*

8. Боднарчук Ю. С., (2018), Зниження опору руху швидкісних суден за допомогою кормової профільованої виїмки/Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю – Миколаїв, С. 27-28. *(здобувачу належить CFD моделювання руху швидкісного судна з встановленими виїмками та параметричний аналіз характеристик виїмки)*

9. Боднарчук Ю. С., (2019), Дослідження засобів зниження опору методами обчислювальної гідродинаміки / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// X міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 45-48. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків та співставлення отриманих розрахунків)*

10. Боднарчук Ю. С., (2019), Особливості вибору параметрів для верифікації та валідації розрахунків опору методами обчислювальної гідродинаміки / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// X міжнародна науково-технічна конференція НУК –

Миколаїв, С. 41-44. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків та проведення верифікації та валідації розрахунків)*

11. Боднарчук Ю. С., (2019), Особливості вибору параметрів для верифікації та валідації розрахунків при використанні методів обчислювальної гідродинаміки/ Ю. С. Боднарчук// IV International Scientific and Practical Conference – Osaka, No.4, pp.-254 - 262. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків канонічних тіл та співставлення отриманих розрахунків)*

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	12
ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ЗНИЖЕННЯ ОПОРУ СУДЕН (Огляд літератури)	22
1.1 Аналіз концепцій, тенденції та перспективи розвитку технологій для зниження опору руху суден	22
1.2 Систематизація даних та аналіз методів зниження опору судна	26
1.3 Дослідження впливу лунок на опір м'яча для гольфу	36
1.4 Огляд науково-дослідних робіт за темою	40
Висновки по розділу 1	45
РОЗДІЛ 2 АЛГОРИТМ ПОБУДОВИ РОЗРАХУНКОВИХ ПРОЕКТІВ В CFD КОМПЛЕКСАХ ТА ПРОЦЕСІВ ВАЛІДАЦІЇ ТА ВЕРИФІКАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ	46
2.1 Порядок та основні принципи побудови розрахункових проектів в CFD комплексі Flow Vision	46
2.2 Порядок та основні принципи побудови розрахункових проектів в CFD комплексі Solid Works Flow Simulation	52
2.3 Особливості вибору параметрів для верифікації та валідації розрахунків	61
Висновки по розділу 2	69
РОЗДІЛ 3 ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИЇМОК НА ОПІР ПІД ЧАС РУХУ КАНОНІЧНИХ ТІЛ	71
3.1 Верифікація програмного комплексу Flow Vision на прикладі задачі сфери з лунками	71
3.2 Дослідження впливу місця розташування та форми виїмок на опір циліндричного тіла	75

	11
3.3 Дослідження впливу виїмок, розташованих на поверхні кругового циліндру	83
Висновки по розділу 3	84
РОЗДІЛ 4 ЧИСЕЛЬНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИЇМОК НА ОПІР РУХУ СУДЕН	88
4.1 Дослідження впливу встановлених виїмок на змоченій поверхні корпусів судна	88
4.2 Модельне дослідження танкера проекту 005RST01	102
4.3 Дослідження впливу виїмок, розташованих на поверхні корпусів підводних човнів	112
Висновки по розділу 4	124
РОЗДІЛ 5 ЗАСТОСУВАННЯ CFD ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ЗНИЖЕННЯ ОПОРУ НА ШВИДКІСНИХ СУДНАХ	128
5.1 Ефективність кормової профільованої виїмки для зниження опору води під час руху швидкісних суден	128
5.2 Зниження опору води під час руху погано обтічного тіла за допомогою пристроїв активного керування прикордонним шаром	134
5.3 Зниження опору води під час руху швидкісного судна за рахунок подачі повітря на днищеву поверхню	137
5.4 Прибутковість використання методу	145
Висновки по розділу 5	151
ВИСНОВКИ	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	156
ДОДАТКИ	166

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

CFD – computational fluid dynamics

Y_k, Y_H – підйомна сила на корпусі

$L_{нб}$ – Довжина судна найбільша

$L_{квл}$ – Довжина судна за ватерлінією

B – Ширина судна

H – Висота борту судна

T – Осадка судна

C_B – Коефіцієнт загальної повноти

C_w – Коефіцієнт повноти ватерлінії

C_m – Коефіцієнт повноти мідель-шпангоуту

Re – число Рейнольдса

θ – кут вектору швидкості відносно набігаючого потоку

v_x, v_y, v_z – проекції вектору швидкості на координатні вісі

$\vec{\Phi}(x, y, z, t)$ – вектор напруженості масових сил

ρ – густина (питома маса) рідини

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості

k – кінетична енергія турбулентності

μ_T – коефіцієнт турбулентної в'язкості

ε – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності

f_a – абсолютне значення змінної

f – розрахункові відносні значення змінної

f_{ref} – опорні величини

τ_k – мінімальний прогоновий час клітинки

τ_{max} – максимальний крок по часу

τ_{own} – заданий крок по часу

D – діаметр

b_j – відстань між лунками

c – ширина лунки

k_j – глибина лунки

V_w, V_n – дотичні швидкості

P – надлишковий тиск

R_k – опір кулі

N_i – номер ітерації

C_D – коефіцієнта опору

l – довжина циліндричного тіла

b – максимальний вигин кривої, що імітує ватерлінію

t – подовження тіла вздовж z напрямку

x_m – абсциса максимального вигину

S – площа частини циліндричного тіла

F_r – число Фруда

v – швидкість руху

g – сила тяжіння

V – об'єм тіла

d – діаметр виїмки

R_0 – радіус заокруглення кромek

A – довжина циліндра

B – ширина циліндра

C – відстань на виїмки на циліндрі

L_{pp} – довжина між перпендикулярами

L_{WL} – довжина по ватерлінії при осадці

C_B – коефіцієнт загальної повноти

C_W – коефіцієнт повноти ватерлінії

C_m – коефіцієнт повноти мідель-шпангоуту

\bar{l}_v – розташування виїмки від довжини судна, починаючи з кормового перпендикуляру

r – розмір виїмки

k – відстань між виїмками

d_n – осадка носом в морських умовах

d_k – осадка кормою в морських умовах

x_c – абсциса центра величини

S_{AP} – площа виступаючих частин

A_{BT} – розрахункова площа бульба

h_B – узвишся центра ваги площі бульба

A_T – розрахункова площа кормового транця

L_R – довжина носового загострення

α_1 – кут носового загострення ватерлінії (град)

v_S – швидкість ходу

V_m – водомісткість

S_m – площа змоченої поверхні моделі

r – повний опір моделі

v_m – швидкість руху моделі

S_m – змочена поверхня моделі

ρ – густина води в басейні

λ – відносне подовження циліндру

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини

D – маси судна

Y – сили підтримки

T – тяги гребного гвинта

R – опору води руху судна

M_{YD} – момент, диферент судна на ніс

φ – кут ходового диференту

\bar{l}_v – місце розміщення виїмки

ΔU – витрати енергії

c_v – теплоємність при постійному об'ємі

T – температура

K – коефіцієнт теплоємкості

C_p – коефіцієнт негативного тиску судна

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. У сучасному світі, в період економічної та екологічної кризи, одним з головних напрямків вдосконалення суден є зменшення витрат палива при перевезенні різних вантажів. Безперервне зростання цін на паливо може поставити під питання доцільність використання суден традиційної форми. Тому дослідження, розвиток та вдосконалення засобів зменшення опору води руху суден є актуальними.

Оптимізація методів зниження опору води являється актуальною задачею гідродинаміки судна. Проте питання проектування та вдосконалення методів в сучасній практиці все ще не повністю вивчено. Воно вирішується за допомогою наукових знань та інженерного досвіду. Практичне використання експериментального та чисельного моделювання в задачах вивчення методів зниження опору судна зазвичай зводиться до методу спроб та помилок. Також з'являється проблема при моделюванні в науково-дослідницькому басейні деяких методів зниження опору, які повинні здійснюватися при рівних з натурними не лише числа Фруда, а й числа Рейнольдса, тобто при фізично нездійсненних умовах. Тому єдиним джерелом отримання наукових результатів дослідження є *CFD* моделювання. Проте, верифікація параметрів *CFD* моделювання здійснюється за результатами фізичного експерименту, який може бути тільки натурним. Тому і виникає дуже актуальна проблема обґрунтування можливості розв'язування задач аналізу.

Також слід відзначити, що методи, які зменшують товщину прикордонного шару та ширину гідродинамічного сліду, так само зменшують і гідроакустичний шум від турбулентних пульсацій, і це є дуже важливим фактором для суден спеціального призначення, що також є актуальним.

Актуальність теми обумовлюється винятковою важливістю комплексного дослідження ефективності методів зниження опору різних типів суден за допомогою встановлення на їх поверхнях спеціальних конструктивних елементів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до положень «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави» (указ Президента України від 20.05.2008 р. №463/2008), транспортної стратегії України на період до 2020 р. (розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р., №2174-р). Дисертаційне дослідження пов'язане з виконанням прикладних держбюджетних науково-дослідницьких робіт «Удосконалення ефективності та надійності малих та швидкісних металевих суден» (*здобувачу належить участь у проведенні чисельних розрахунків, аналіз та співставлення отриманих здобувачем розрахунків*), прийнятих Міністерством освіти та науки, молоді та спорту України 25.09.2013 р., номер державної реєстрації №0113U000244, номер теми 1897, «Розробка методології підвищення ефективності та безпеки річкової транспортної системи України» (*здобувачу належить участь у проведенні чисельних розрахунків, аналіз та співставлення отриманих здобувачем розрахунків*), прийнятої Міністерством освіти та науки України 25.10.2017 р., номер державної реєстрації №0117U000347, номер теми 2085.

Мета і завдання дослідження.

Мета і завдання дослідження полягає в розробці нових та вдосконаленні існуючих засобів, що забезпечують ефективне зниження опору руху суден.

Для досягнення мети роботи передбачається вирішення наступних задач:

1. Проведення параметричного аналізу гідродинамічних явищ при встановленні виїмок на поверхнях канонічних тіл (шар, циліндр та циліндричне тіло) з метою зниження їх опору.
2. За допомогою методів обчислювальної гідродинаміки провести аналіз ефективності встановлення виїмок на поверхнях суховантажного судна, танкера,

швидкісного судна та підводних об'єктів з метою покращення умов обтікання та зниження їх опору.

3. Експериментальне визначення опору моделей танкера та підводного об'єкту сигароподібної форми з встановленими виїмками в науково-дослідницькому басейні з метою верифікації результатів *CFD* моделювання.

4. Дослідження можливості використання повітряного змащення на швидкісних судах без використання механізмів примусового нагнітання повітря з метою удосконалення даного методу.

Об'єкт дисертаційного дослідження – процес зменшення опору суден та об'єктів океанотехніки шляхом встановлення виїмок та використання повітряного змащення.

Предмет дисертаційного дослідження – закономірності впливу параметрів форми, місця розташування, кількості виїмок та умов подачі повітряного змащення, які забезпечують ефективне зниження опору руху суден.

Методи дослідження. Основним методом дослідження обрано *CFD* моделювання руху натурних об'єктів в рідині, яке містить метод кінцевих об'ємів для чисельного розв'язування рівнянь RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes equations). Для отримання надійних результатів виникає необхідність додатково визначати кількість клітинок розрахункової сітки, ступень адаптації сітки, крок по часу, модель турбулентності та забезпечувати ітераційну збіжність, виконувати параметричний аналіз розрахунків. Таке моделювання реалізоване в сучасних *CFD* пакетах, таких як Flow Vision (компанія TESIS) та Flow Simulation (США, Франція, Канада). Також використовувалися метод моделювання в дослідницькому басейні та порівняння отриманих результатів в *CFD* пакетах, метод верифікації, методи загально логічного аналізу та порівняння.

Наукова новизна одержаних результатів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в обґрунтованому визначенні впливу параметрів форми виїмок, їх кількості й місця розташування на поверхні судна

та умов подачі повітряного змащення, що забезпечують ефективне зниження опору руху суден. В результаті досліджень отримано наступні наукові результати:

Вперше:

- доведена можливість зниження гідродинамічного опору канонічних тіл шляхом розміщення на їх поверхні виїмок спеціальної форми, яка отримана за допомогою сучасних методів обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу впливу розмірів, форми, місця розташування, кількості і швидкості руху та дозволяє знизити опір цих тіл при певних умовах (для розглянутих форм канонічних тіл найвища ефективність при числах Рейнольдса $2 \cdot 10^7 \div 3 \cdot 10^7$) від 5 до 20%;

- науково обґрунтована та доведена можливість зменшення опору різних типів суден шляхом розміщення виїмок спеціальної форми на їх поверхнях за допомогою сучасних методів обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу впливу розмірів, форми, місця розташування, кількості і швидкості руху, що дозволяє знизити опір від 2 до 20% для $Re=1,3 \cdot 10^8 \div 5 \cdot 10^8$ і якщо виїмки розташовані на відстані в 40% довжини судна починаючи з кормового перпендикуляру;

- виконано експериментальні дослідження впливу виїмок на опір руху моделей надводного судна і підводного об'єкта, що дозволило визначити їх характеристики, які сприяли зниженню опору моделі надводного судна на 3% та підводного об'єкту на 2%; шляхом порівняння отриманих експериментальних результатів з чисельними розрахунковими методами і засобами обчислювальної гідродинаміки доведена їх добра збіжність.

Набуло подальшого розвитку:

- технологія використання повітряного змащення для зниження опору руху швидкісних суден без застосування спеціальних приладів нагнітання повітря, яке подається лише за рахунок зниження тиску в зареданному просторі. Методами обчислювальної гідродинаміки доведено, що за рахунок природної подачі повітря опір судна знижується на 10-20% в залежності від швидкості руху при $Re = 1 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^8$.

Теоретичне значення дослідження полягає у розробці загальної схеми та алгоритму вибору засобів впливу на прикордонний шар, які забезпечують зниження опору руху під час проектування суден. Зниження опору сприяє зменшенню витрат палива і вартості перевезеного вантажу (пасажирів) та терміну окупності витрат при впровадженні цих засобів на новому або вже введеному в експлуатацію судні.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1) Розроблено методику визначення можливості зниження опору руху об'єктів океанотехніки з встановленими місцевими особливостями, в основу якої покладені методи обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу;

2) за рахунок застосування запропонованих засобів, опір надводних суден при встановленні на поверхні днища профільованих виїмок може бути знижено до 20%, а підводних об'єктів при встановленні виїмок у вигляді кілець – до 6%;

3) доведено, що визначення параметрів виїмок для кожного судна необхідно проводити окремо, а найбільш ефективним засобом є *CFD* моделювання на натурних об'єктах;

4) удосконалено засіб повітряного змащення підводної частини корпусу швидкохідних суден шляхом природної подачі повітря у зону зниженого тиску з ефектом зменшення опору руху до 20%;

5) запропоновані засоби зниження опору можуть бути використані під час проектування нових або модернізації існуючих суден.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є закінченим науковим дослідженням. Усі теоретичні та практичні результати *CFD* моделювання дисертації були отримані здобувачем особисто. В публікаціях, що написані в співавторстві, здобувачу належать такі результати: [2,3] – отримання числових результатів, що до ступеня ефективності використання профільної виїмки на поверхнях надводних суден і підводних човнів спрямованих на зниження опору тіл при їх русі в рідині; [5] – проведення числових розрахунків по поверхні ватерлінії з різним місцем розташування та різною формою виїмок, а також форми самої ватерлінії;

[6] – верифікація виїмок на поверхнях двох типів підводних човнів за допомогою CFD моделювання та порівняння числових розрахунків з модельним експериментом;
 [18] – проведення верифікації параметрів виїмок на днищовій поверхні судна.

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційної роботи докладалися й отримали позитивну оцінку на наступних науково-технічних конференціях:

V науково-практична конференція всеукраїнського конкурсу наукових робіт (м. Миколаїв, 2013р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (м. Миколаїв, 09.10.2013р., 09.10.2014р., 09.10.2018р.); Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю «Сучасні технології проектування, побудови, експлуатації та ремонту суден, морських технічних засобів і інженерних споруд» (м. Миколаїв, 23.05.2013р., 23.05.2014р. 23.05.2018р., 23.05.2019р.); IV International Scientific and Practical Conference «Perspectives of world science and education» (Osaka, 2019p.).

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних літературних джерел і додатків. Дисертація містить 152 сторінок основного матеріалу, 158 рисунків, 19 таблиць, з цього 133 сторінок основного тексту, 10 сторінок списку використаних джерел (100 найменувань) та 19 сторінок додатків.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ЗНИЖЕННЯ ОПОРУ СУДЕН

(Огляд літератури)

1.1 Аналіз концепцій, тенденції та перспективи розвитку технологій для зниження опору руху суден

Моря та океани надають безмежні транспортні можливості. Світовий транспортний флот щорічно перевозить морем майже 10 млрд тонн вантажів. Морська діяльність різноманітна і економічно вигідна. На сьогоднішній день суднобудівна наука та практика за кордоном знаходяться в постійному русі до нових цілей. У боротьбі за конкурентоспроможність продовжується зростання кількості суден середніх розмірів світового флоту. Разом з цим, через збільшення розмірів судна, почали проявлятися й деякі проблеми: чим більше судно, тим менше портів зможе його прийняти. Водночас в світі стрімко зростає інтерес до енергоефективних суден. У зв'язку зі зростанням цін на бункер витрати на паливо стали основними компонентами морських транспортних витрат, на відміну від капітальних та інших експлуатаційних витрат.

Найсерйознішим завданням суднобудування є подолання найбільшого зовнішнього фактору – опору судна. Сьогодні сучасне проектування суден спрямоване на створення максимально гладких корпусів, що, в свою чергу, суттєво сприяє зниженню опору.

Найбільші суднобудівні країни в 2016 році, засновані на доробках в валовому тоннажі (в тисячах) (рисунок 1.1) [1]. Дана статистика, створена на основі вартості замовлення, відображає рейтинг провідних суднобудівних компаній по всьому світу станом на березень 2016 року. Два перших місця в цьому рейтингу посіли компанії "Hyundai HI" та "Daewoo Shipbuilding". Також ці дві компанії є світовими лідерами щодо введення інноваційних технологій для зниження опору руху судна.

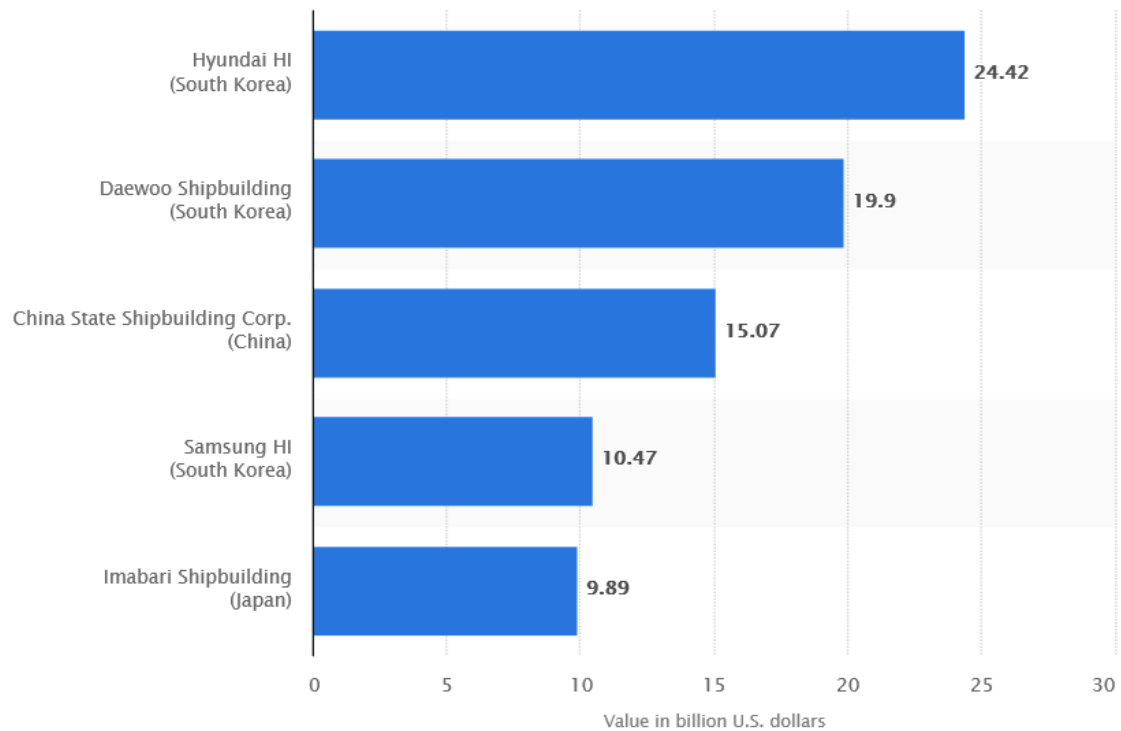


Рисунок 1.1 – Рейтинг провідних суднобудівних компаній [1]

Зокрема, приділяється особлива увага формі носової частини судна, адже саме форштевень зустрічає першу хвилю навантаження. Конструкцію бульба розвивали і використовували в Японії, де деякі кораблі часів Другої світової війни були оснащені бульбами, але японські дослідження в цій області не поширювалися на західний світ, і результати багатьох досліджень були втрачені після війни. І якщо до початку 80-х років минулого століття ніс судна виконувався переважно з похилим форштевнем, то всі наступні судна забезпечувалися бульбовим носом, конфігурація якого продовжує удосконалюватися і по сьогоднішній день з метою визначення оптимально обтічної форми для кожного конкретного судна. При проектуванні мегаконтейнеровоза в Республіці Корея місткістю 18270 TEU, який може перевозити 20150 контейнерів (рисунок 1.2), для підвищення ефективності було проаналізовано понад 35000 варіантів форткорпусу [2]. Була здійснена параметрична оптимізація з метою зниження використання палива з урахуванням потужності двигуна та витрат палива, а також розмірів судна та моделей експлуатації, різних комбінацій швидкості – осадки.



Рисунок 1.2 – Найбільше вантажне судно (перевозить 20150 контейнерів) [2]

В достатній мірі на опір води впливають виступаючі частини корпусу, тому сучасні конструкції судна йдуть від технічних рішень, які передбачають наявність пасивних заспокоювачів хитамиці, протекторного захисту від корозії та інших елементів підводної частини корпусу, що збільшують його опір. Для покращення аеро- та гідродинамічних характеристик судна компанія "Mitsubishi Heavy Industry Ltd" створила проект з рядним розташуванням сферичних танків [3], конструктивно інтегрованих з судовим набором в трюмному просторі (рисунок 1.3).

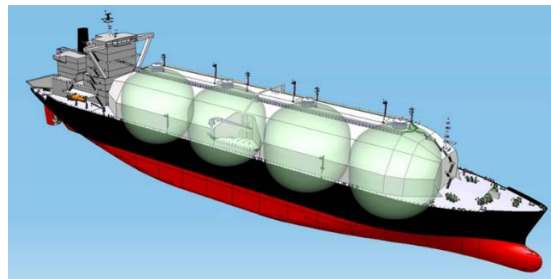


Рисунок 1.3 – Судно з сферичною системою танків [3]

Це дало змогу збільшити жорсткість, покращити опір на судовий набір в зоні розміщення танків, підвищити власну стійкість та міцність. Ця система танків називається SAYAEND. Сферичні танки закриті єдиним протягнутим по корпусу судна напівсферичним куполом, який також міцно зв'язаний з судовим набором. Слід відзначити, що система SAYAEND дозволила майже на 16% збільшити місткість, не збільшуючи при цьому ширину судна. Однак при тому, що така система знижує аеродинамічний опір руху судна та покращує умови експлуатації, в цілому вона має недолік – підвищує відповідальність верфі та потребує більше вимог під час робіт і закриванні куполів.

Крім того, одним з основних методів подолання опору є правильний підбір оптимальної потужності головного двигуна судна. Якщо сумарна потужність машинної установки буде недостатньою, це призведе до зниження хідкості і підвищення витрат палива. А оскільки швидкість судна є важливим комерційним показником, це призведе до прямих збитків судновласника.

Не менш важливим критерієм, що впливає на опір води, є стан поверхні підводної частини корпусу. Відомо, що зовнішня обшивка судна часто обростає молюсками та іншими морськими організмами, що може призвести до підвищення опору і, як наслідок, збільшення витрат палива і зниження швидкості ходу до 15%. Щоб уникнути подібних явищ, прийнято проводити регулярне чищення корпусу судна в умовах докування піскоструминним чи іншим методом. Компанія "Damen" створила EcoLiner, який працює на скрапленому природному газі (LNG), але також використовує іншу інновацію - повітряне мастило для корпусу "ACES" (рисунок 1.4) [4].

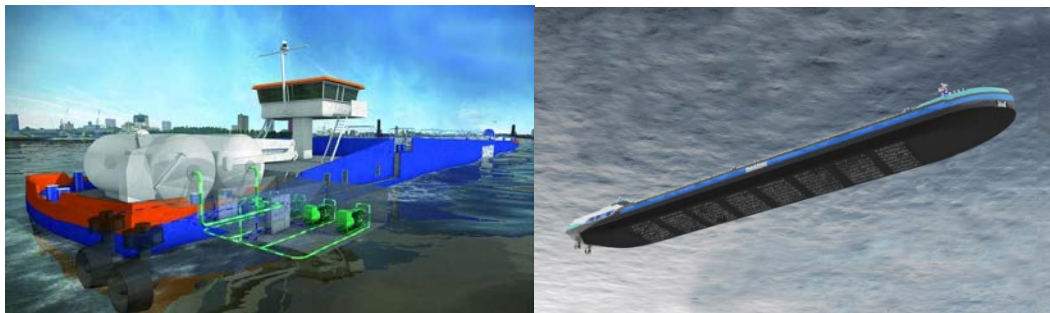


Рисунок 1.4 – EcoLiner, проект компанії "Damen" [4]

Повітря подається під корпусом судна і створює шар повітряних бульбашок, які вкривають дно судна. Поєднання цих нововведень призводить до вражаючої економії палива та скорочення викидів. Так, при випробуваннях в дослідницькому басейні та ходових випробуваннях модель "ACES" продемонструвала зниження опору та економію споживання палива в залежності від швидкості та завантаженості до 15%. У 1998 році була започаткована розробка серії десантних катерів на повітряній подушці, завдяки якій катер розвивав швидкість до 40 вузлів, типу "Шельф", призначений для транспортування 3-х БМП або БТР. З настанням 2000-х років стало очевидним, що

сучасний флот потребує більш швидкісних суден, які мають істотну десантомісткість і вантажопідйомність. Це призвело до переробки початкового проекту з використанням напрацювань. Так з'явився новий проект транспортно-десантного катера на повітряній каверні з пропульсивною установкою під назвою "Дюгонь" для дій в морях і на великих озерах в країнах з різними кліматичними умовами.

Аналізуючи концепцію енергоефективності суден, можна зробити висновок, що компанії при проектуванні судна для зниження опору руху використовують комплексні методи, поєднуючи для більшого ефекту одночасно декілька.

Таким чином, проаналізувавши стан світового ринку суден та концепцію енергоефективних суден, можна зробити висновок, що тенденція введення технологій зниження опору руху судна з метою зниження витрат на паливо та покращення ходових якостей є перспективною для будівництва суден майже усіх типів.

1.2 Систематизація даних та аналіз методів зниження опору судна

Традиційний шлях зниження опору - вдосконалення форми корпусів, правильний вибір співвідношення головних розмірів.

Основними характеристиками судна, що впливають на опір води руху судна, є водотоннажність і число Фруда. Останнє дозволяє судити про швидкісний режим судна. Усі судна можна підрозділити на тихохідні ($Fr < 0,2$), середньо швидкісні ($0,2 < Fr < 0,35$) і швидкохідні ($Fr > 0,35$).

Перейдемо до розгляду основних характеристик форми судна, що визначають опір руху. Найбільш важливою з них є відносна довжина у формі $\Psi = \frac{L}{\sqrt[3]{V}}$, менш характерною є більш звична і проста величина L / B . З ростом Ψ зростає площа змоченої поверхні і опір тертя R_f , але зменшується залишкове опір R_r [5]. Кожному значенню швидкості відповідає деяке оптимальне значення параметра Ψ : чим більше Fr , тим більше має бути Ψ . Якщо для судна прийняти занижене значення відносної довжини, буде швидко рости залишковий опір (опір форми - при малих швидкостях, хвильовий - при великих), якщо завищене - зростає опір тертя, хоча і не так швидко.

Відомо кілька наближених формул, які використовуються на початкових стадіях проектування суден для вибору головних розмірів. Наприклад:

$$\Psi = 3,4 + 10Fr.$$

Вплив L / B аналогічний, але ця характеристика не визначає однозначно довжину судна при відомій водотоннажності.

Повнота судна найчастіше характеризується коефіцієнтом загальної повноти δ . У звичайних транспортних суден, у яких коефіцієнт повноти мідель-шпангоута β дуже близький до 1,00 (0,98 - 0,99), більш звичний коефіцієнт δ мало відрізняється від ϕ і цілком може його замінити. Якщо розглядати криві коефіцієнта повного опору C для різних δ , то можна помітити, що, починаючи з деякої швидкості, опір різко зростає. При цьому можна встановити відповідність між δ і Fr : із зростанням однієї з цих величин інша зменшується.

Сучасні компанії пропонують декілька основних напрямків удосконалення елементів рушійного-рульового комплексу суден: зміна форми носових обводів, кормових обводів та форми гвинта.

Оптимізація носових обводів включає в себе створення бульба та вибір кута входу ватерлінії. Форма бульба створюється таким чином, щоб він зменшував хвильовий опір, створюючи власну хвилю, яка йде в проті фазі з хвилею створеною корпусом судна [6].

Використання бульба є найбільш ефективними якщо корпус судна вузький, а його швидкість близька до максимальної швидкості судна. Як правило, за рахунок бульба можна отримати близько 14% паливної ефективності в порівнянні з судном без бульба. Разом з ним використовують V-подібну форму носу судна, щоб пом'якшити ударні навантаження. Судна з повними обводами, такі як танкери і балкери, зазвичай мають бульб з великою площею перетину і V-подібною формою верхньої частини носових обводів.

При виборі оптимальних параметрів кормових обводів враховуються усі переваги та недоліки типів корми, будь то транцевий, крейсерський або еліптичний

тощо. Найбільші проблеми при проектуванні кормової частини судна, щоб пом'якшити кормові хвилі, це уникнути завихрень і поліпшити потік який надходить до гвинта. Покращуючи потік навколо корми судна тим самим зменшується опір корпусу. Також для поліпшення потоку використовують спеціальні пристрої, такі як кормові клапани.

Опір кормових обводів, який спричиняється виступаючими частинами, складає близько 2 - 3 відсотків від загального опору для вантажного судна в умовах спокійної води. Близько половини даного опору приписують кілю, а інша половина - рулю. Опір спричинений рулем зустрічається зазвичай на нестійких суднах і може керуватися за допомогою скегу. Тунель підводного підйомника також може значною мірою сприяти на загальний опір судна, приблизно в межах від 1 до 2 відсотків. Сітки часто розміщуються над отвором, перпендикулярно напрямку потоку. Вони служать для руйнування ламінарного потоку та зменшення вихорів.

Перспективними вважаються методи зменшення опору тертя шляхом впливу на прикордонний шар (ПШ), оскільки саме опір тертя становить найбільшу частину повного опору середніх і великих помірно швидкохідних суден.

Один із широко відомих методів - відсмоктування ПШ через проникну поверхню (отвори або щілини) [7].

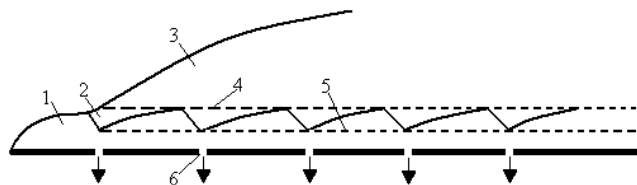


Рисунок 1.5 – Схема відсмоктування рідини з ПШ [7]

На рисунку 1.5 зображено 1- ділянка природного ламінарного шару, 2- зміна товщини шару при відсмоктуванні рідини через щілини 6, 3- область турбулентного шару, 4- значення товщини шару, відповідному $R_{\text{екр}}$, 5- нижня границя, яка відповідає турбулентній дії шорсткості. Доведено, що при цьому відбувається ламінаризація за рахунок зменшення товщини ПШ і підвищення його стійкості до зовнішніх впливів.

Правда, при цьому з'являється додатковий опір, обумовлений переважно гідравлічними втратами, пов'язаними з рухом відсмоктаної рідини, а також з втратою кількості руху потоку. Відсмоктування не повинно бути занадто інтенсивним, так як це веде до зростання опору; оптимальна кількість рідини яка відсмоктується порівняно невелика. Відсоток зниження опору тертя залежить від Re , із зростанням якого ефект зростає, складаючи 70, 78 і 84% при $Re = 10^6$, 10^7 і 10^8 відповідно. Якщо врахувати, що у натурних суден числа Рейнольдса перевищують 10^8 , а іноді і 10^9 , то опір тертя у них може зменшитися в 7 - 8 разів.

Позитивний ефект може дати підігрів поверхні тіла, що занурене в рідину (або охолодження - в повітрі), в результаті чого в'язкість біля поверхні буде меншою, ніж у зовнішньому потоці. Найкращі результати в сенсі підвищення стійкості ламінарного прикордонного шару виходять, коли в'язкість біля стінки знижується в 2 рази, що відповідає збільшенню температури води приблизно на 30° .

У ПШ можна подавати не тільки воду, відібрану в іншому районі, але й газ (повітря) – такий спосіб іноді називається «повітряне мастило». На рисунку 1.6 [8] зображено схема судна з даним методом зниження опору.

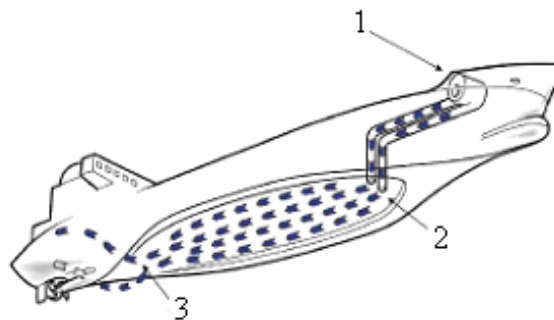


Рисунок 1.6 – Судно з повітряним мастилом [8]: 1 – компресор; 2 – повітряна порожнина; 3 – повітряне відхилення за гвинтом

Коли рій бульбашок швидко надходить з невеликих отворів у днищі судна, утворюється шар товщиною 1-2 см, що покриває днище, що знижує опір, оскільки повітря володіє в 850 разів меншою густиною в порівнянні з водою. При русі судна цей шар прагне вибитися з-під днища вгору до бортів і в корму до гвинта. Однак підтримка необхідного напору повітря не вимагає при цьому великих витрат енергії,

що в підсумку дає економію по паливу в 5-15%. Так, для військових кораблів, які зазвичай мають V образні обводи, що забезпечують високі ходові якості, ця система не підходить. На більшості вантажних суден, завдяки великій площі плоскої частини днища, навпаки, повітряне мастило застосовується з великою ефективністю. Але навіть при значній площі днища, бульбашки все одно прагнуть вислизнути з-під корпусу, а методи їх утримання виправдовують себе. Один з них полягає в локалізації повітряного шару між кромками, довжина яких становить кілька сантиметрів, розташованих по лівому і правому борту. Інший полягає в доданні корпусу судна такої форми, яка запобігала б потрапляння потоку бульбашок на лопаті гвинта, що в такому випадку знижувало б ефективність його роботи. Цей варіант дозволяє здійснювати пристрій спеціальних ніш у корпусі глибиною до декількох метрів.

Схожим методом є створення на змоченій поверхні штучних каверн (кавітаційних) шляхом установки похилих козирків (кавітаторів). При великій швидкості руху за козирком виникає газовий міхур - кавітаційна каверна. Воднотонажне судно з повітряними кавернами на днищі обладнане пристроєм для створення під днищем штучних каверн, які мають систему каверно утворювання, що складається з розташованих на днищі один за одним по довжині судна поперечних насадок у вигляді похилих пластин і побортно встановлених на днище поздовжніх обмежувальних кілів. Судно має також джерело примусової подачі повітря по трубопроводах під днище судна для створення і підтримки утворених за поперечними насадками каверн. На рисунку 1.7 [7] зображена схема штучних каверн.

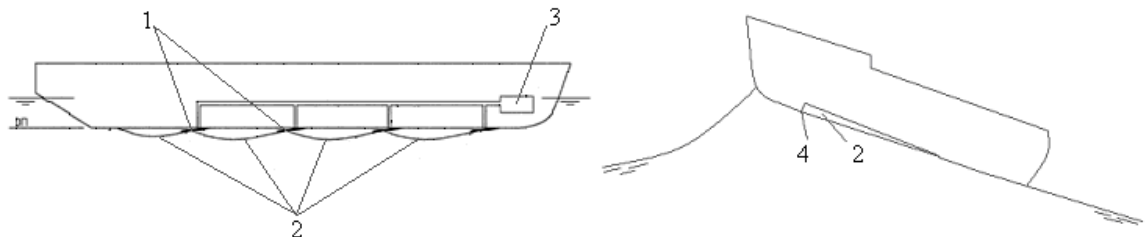


Рисунок 1.7 – Схема формування штучної каверни на тихохідному судні і з плоским дном та на бистрохідному судні [7]: 1-козирьок-кавітатор, 2- каверна, 3- джерело примусової подачі повітря, 4- редан

При використанні даного методу опір тертя знижується, хоча опір форми, навпаки, дещо зростає. У каверну може подаватися газ, що збільшує її розміри. Розрахунки показують, що існує деяка гранична довжина каверни, при якій її опір невеликий, а витрата газу на її підтримку нікчемна. Випробування, проведені на баржі водотоннажністю 3000 т, показали зниження опору приблизно на 25%, а випробування теплоходу водотоннажністю 5300 т – на 16 - 17%.

Пристрій має недолік, що полягає у втраті водотоннажності судна при відсутності повітря у виїмці, що може привести до необхідності збільшення висоти борту судна для виконання вимог класифікаційних товариств до величини надводного борту або до необхідності збільшення висоти комінгсів вантажних трюмів для збереження їх вантажомісткості, що, в свою чергу, тягне за собою збільшення маси корпусу і зниження вантажопідйомності судна. Пристрій може бути використано тільки на нових судах.

Дослідники вже досить давно звернули увагу на те, що деякі морські тварини, наприклад дельфіни, здатні розвивати високу швидкість руху, яку не вдалося пояснити теоретично. Це наштовхнуло на дослідження опору тіл з пружними покриттями.

Деякі фахівці вважають, що велика частина тулуба дельфіна бере участь у створенні рушійної сили, тобто тулуб тварини одночасно виконує функції корпусу і рушія. У момент різких прискорень на шкірі виникають хвилеподібні складки, що поширюються від голови до хвоста, які називають хвилею, що біжить. При цьому виникають турбулентні вихори і знижується опір.

У різних країнах проводилися експериментальні і теоретичні дослідження, які підтвердили можливість зниження опору за допомогою обробки корпусу судна для мінімізації його фізичної та біологічної шорсткості. Шорсткість поверхні залежить від типу покриття, кількості іржі, тріщин в покритті та забрудненні. Фізичну нерівність можна звести до мінімуму шляхом застосування деяких запобіжних заходів; однак дуже важко контролювати біологічну шорсткість (забруднення). В принципі можуть

існувати покриття, для вирішення проблеми першого виду, двох типів: пасивні, які під дією змінних нормальних і дотичних напружень у обшивки отримують пружні деформації (стиснення та зсуву), і активні, деформації яких регулюються по більш складному закону. Так наприклад на рисунку 1.8 [9] зображено покриття яке являє собою складну гумову оболонку товщиною близько 2 мм з гладкою зовнішньою поверхнею. Внутрішня сторона оболонки з безліччю розташованих у шаховому порядку гумових стовпчиків з'єднувалася з внутрішнім шаром гуми такої ж товщини, наклеєним на поверхню корпусу. Простір між стовпчиками, що представляє собою безліч капілярних судин, заповнювалося органічної рідиною з відносно великою в'язкістю.

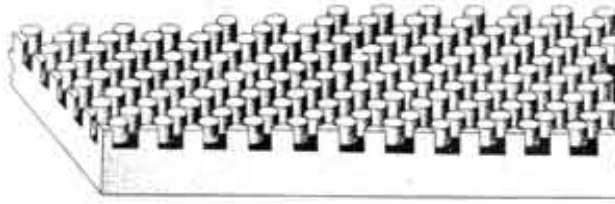


Рисунок 1.8 – Схема покриття типу "шкіра дельфіна" [9]

За задумом, поки режим обтікання в прикордонному шарі буде ламінарним, покриття повинне вести себе як жорстка поверхня, при цьому демпфіруюча рідина знаходиться в спокої, а поверхня діафрагми залишається гладкою. При виникненні в прикордонному шарі коливальних або хвильових рухів на гребні і порожнині повинна з'явитися різниця тиску, що спричинить поширення хвилеутворення уздовж покриття і коливання гумової оболонки, а через неї і демпфіруючої рідини. При цьому турбулізація прикордонного шару повинна знижуватися, а вірніше, перехід ламінарного режиму обтікання в турбулентний буде відсовуватися в область більших швидкостей.

В даний час відсутня загальна теорія прикордонного шару уздовж пружної поверхні, а наявні результати, отримані низкою дослідників, суперечливі.

У 40-х роках було виявлено, що тертя о тверді стінки, спричинене турбулентною течією слабких водних розчинів полімерів з лінійною структурою молекул, таких як полеоксиди, поліакріламід та інші, і молекулярній масі $M = 10^6 \div 10^7$, може бути

приблизно у трічі менше, ніж тертя води без домішків. Цей ефект спостерігається при таких малих концентраціях речовин, що густина та в'язкість розчинів не відрізняється від таких для води. Експерименти з розчинами в трубах показали, що малі додавання полімерів не викликають збільшення критичного числа Re . Дослідження різних способів введення розчинів полімерів на поверхню рухомого в воді тіла показало, що оптимальним є нагнітання розчину крізь нахилені до поверхні щілину або ряду щілин, які сліднують одна за одною з певним кроком.

Широке використання полімерних та інших добавок обмежується не тільки недостатньою вивченістю цього питання, але і екологічними міркуваннями.

Інтерцептори – висунуті поперек набігаючого потоку пластини, що дозволяють цілеспрямовано керувати відривом потоку на несучих поверхнях корпусу і на лопатях рушіїв швидкохідних суден.

Створення швидкохідних катерів з комплексами автоматично керованих інтерцепторів - один з перспективних напрямків сучасного суднобудування. Не є таємницею, що традиційні шляхи оптимізації їх обводів для заданої швидкості ходу в даний час можуть вважатися практично вичерпаними, тоді як встановлення інтерцепторів на поверхнях, що глісують значно покращує їх гідродинамічні характеристики. Так, встановлення інтерцепторів на днищі судна в районах транця і міделя при висуненні їх призводить до виникнення перед ними зон підвищеного тиску, які зменшують осадку і, відповідно, змочену поверхню судна. В результаті під днищем утворюється повітряна каверна, істотно знижується гідродинамічний опір корпусу судна, швидкість зростає до 48-50 вузлів і зберігається при значному хвилюванні. Крім того, розміщаючи інтерцептори в діаметральній площині судна, їх під бортним висуненням і прибиранням (в проті фазі), можна керувати креном і диферентом судна, що дозволяє використовувати інтерцептори в тому числі і як заспокоювачі хитавиці (рисунок 1.9) [10].

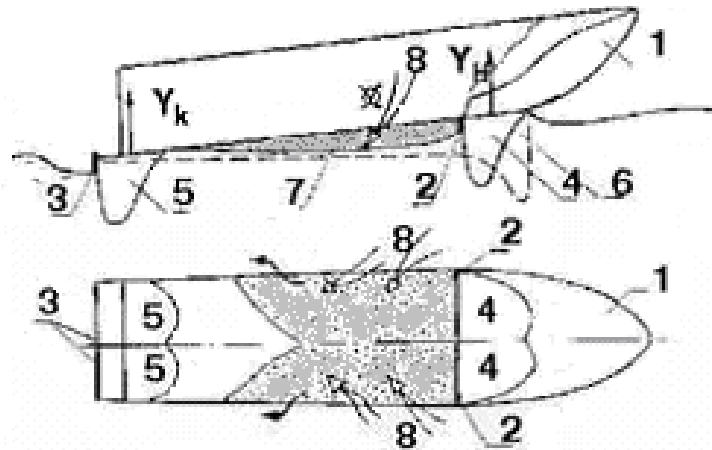


Рисунок 1.9 – Принцип роботи системи інтерцепторів [10]: 1 - корпус катера; 2 - носові інтерцептори (НІ); 3 - кормові інтерцептори (КІ); 4,5 - епюри тисків перед НІ і КІ; 6 - епюра тиску від корпусу катера; 7 - днищова каверна за НІ; 8 - підсос повітря в каверну; Y_k і Y_n - підйомна сила на корпусі від 4 і 5.

В якості експерименту такі системи були реалізовані на самохідних напів-натурних моделях, а також на швидкохідному катері проекту 205 «Экби» масою 190т зі швидкістю повного ходу 42-46 вузлів. Схема приводу кормового інтерцептора наведена на рисунку 1.10.

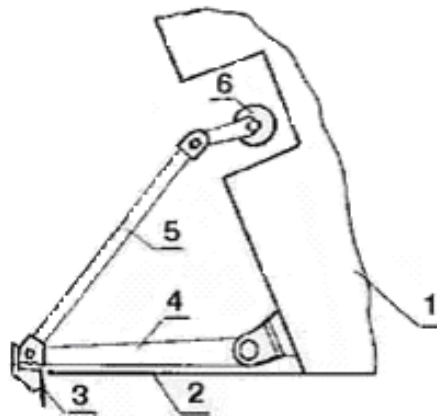


Рисунок 1.10 – Схема приводу кормового інтерцептори [10]: 1 - корпус катера; 2 - транцева плита; 3 - інтерцептор; 4 - важіль; 5 - тяга; 6 - привід

Результати натурних випробувань показали, що на тихій воді симетричні щодо ДП судна висунення інтерцепторів, що забезпечують оптимальну посадку судна, дозволяють на 20-30% знизити опір води руху, що може при відповідному виборі

рушіїв забезпечити приріст швидкості повного ходу на 3-4 вузли. Однак на перехідному режимі руху можлива деяка втрата поздовжньої остійності судна, що можна компенсувати висуненням носових інтерцепторів на $1/2$ висоти (остаточно підбирається експериментально). На хвилюванні, при відповідній настройці коефіцієнтів, можливе зниження параметрів бортової качки на граничних хвилюваннях і швидкостях ходу в 3-5 разів (максимальні значення відповідають хвилюванню, близькому до регулярного, на курсових кутах, близьких до 90°) і параметрів кильової хитавиці - до 1.5 разів.

Крім того, випробування на хвилюванні показали, що при працюючих інтерцепторах в 1.5-3 рази поліпшується курсова стійкість руху суден, а також значно зменшуються середньо вертикальні прискорення на їх корпусі [11].

Стосовно до швидкісних суден можна дати наступні рекомендації:

- Для суден з широкою транцевою кормою для швидкостей ходу, відповідних $Fr > 2.5$, можлива установка інтерцепторів на міделі і транці. В якості приводів інтерцепторів можуть бути використані швидкодіючі приводи або електромагнітні сердечники подвійної дії, так як найбільша ефективність помірної качки в натурних умовах була отримана при роботі приводів в режимі, близькому до імпульсного (прибрані - висунуті наполовину - висунуті повністю);
- Для суден зі швидкостями ходу, відповідними $Fr > 1.5$, раціональна установка тільки кормових інтерцепторів;
- Судноводіям-любителям можна рекомендувати установку кормових інтерцепторів з механічним приводом з рубки керування для оптимізації посадки судна на проміжних швидкостях ходу (симетричні висунення) або для зниження діаметра циркуляції і крену на ній (несиметричні висунення).

В наш час використовується високоточні електроприводи інтерцепторів на швидкохідних катерах(рисунок 1.11) [12].

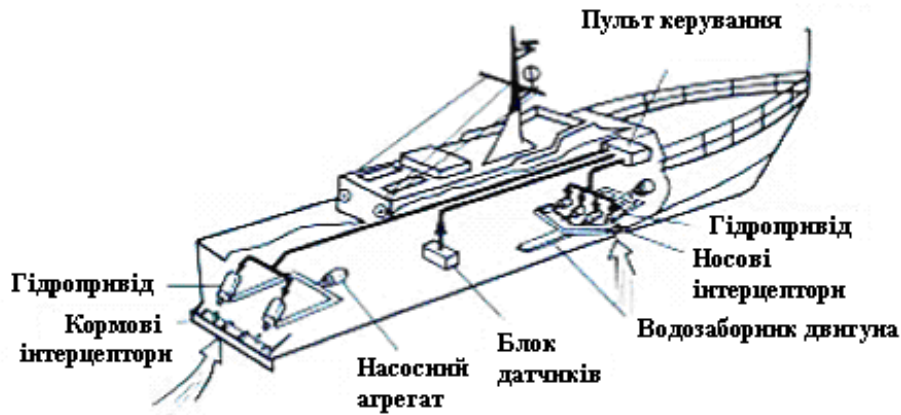


Рисунок 1.11 – Схема високоточного електроприводу інтерцепторів на швидкохідних катерах [12]

Комплекс автоматичного управління інтерцепторами включає в себе електронну систему управління і електро механічну систему приводів інтерцепторів.

Система керування електроприводами інтерцепторів, використовуючи інформацію навігаційної системи, формує сигнали управління інтерцепторами. Інформаційними параметрами служать швидкість руху судна і кутові швидкості хитавиці.

Керуючими параметрами є поточні значення величин, на які в кожен момент часу повинен бути висунутий кожен інтерцептор, щоб ефективно стримувати хитавицю і вивести судно на задану швидкість руху.

1.3 Дослідження впливу лунок на опір м'яча для гольфу

М'яч для гольфу (рис. 1.12) в порівнянні з гладким м'ячем при ударі пролетить у два рази більшу відстань [13].



Рисунок 1.12 – М'яч для гольфу [13]

Це пов'язано з поведінкою потоку повітря на поверхні м'яча для гольфу, коли він знаходиться в польоті. Розглянемо картину обтікання м'ячів, коли вони летять у повітрі (рис. 1.13) [14]. На рисунку 1.6 порівнюються повітряні потоки для гладкої кулі (верхня) і м'яча для гольфу (внизу), в горизонтальному польоті (або в аеродинамічній трубі).

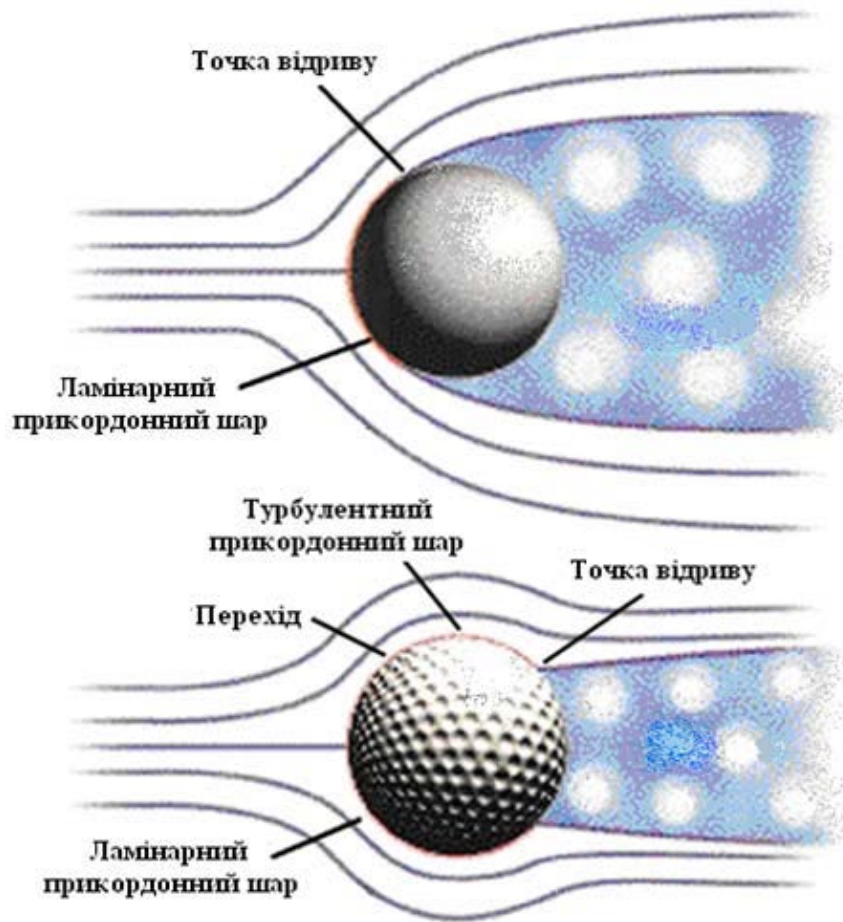


Рисунок 1.13 – Картина обтікання м'ячів [14]

У випадку м'яча з гладкою поверхнею повітряний потік в прикордонному шарі має ламінарний тип течії. Для нього прикордонний шар відривається від поверхні кулі досить рано, у зв'язку з цим він створює широкий турбулентний слід за собою. Поверхня м'яча для гольфу створює турбулентність у своєму прикордонному шарі, а так як турбулентний прикордонний шар має більше енергії, ніж ламінарний прикордонний шар, то він відділяється від поверхні кулі набагато пізніше, ніж ламінарний прикордонний шар у гладкої кулі. Через те, що відрив потоку відбувається

пізніше, турбулентний слід за м'ячем для гольфу є більш вузьким, що призводить до зменшення сили опору.

Зараз проводиться чимало робіт, спрямованих на уточнення зв'язку між опором і картиною течії навколо сфери. Наприклад, на рисунках 1.14–1.15 [15] показані вектори швидкості (XY площині) навколо сфер у разі, коли $Re = 1,27 \times 10^5$. На рис. 1.14 показані вектори швидкостей навколо сфер в цілому. Точки відриву у сфер з поглибленнями зміщуються вниз за течією. На даному зображенні можна спостерігати, що у поглиблень типу конус і типу дуга точка відриву зміщується більше, ніж у трапецієподібного типу поглиблення.

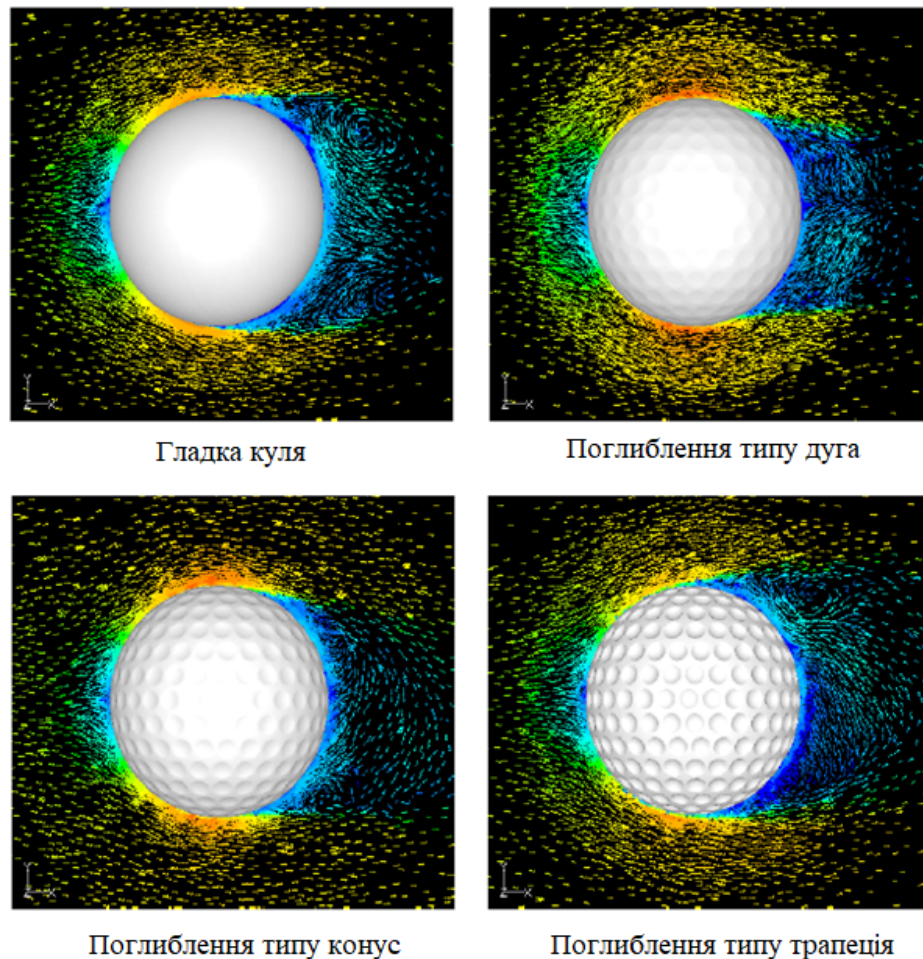


Рисунок 1.14 – Вектори швидкостей навколо сфер в цілому [15]

На рисунку 1.15 зображені вектори швидкості навколо сфери з кутами $\theta = 67,5^\circ$ і до $\theta = 135^\circ$ відносно набігаючого потоку. Швидкість всередині поглиблень

повільніша, ніж за межами заглиблень, потік змінюється всередині поглиблення поруч з точкою відриву. Тут можна спостерігати, що у поглиблень типу конус і типу дуга характер векторів швидкості змінюється практично в одному куті.

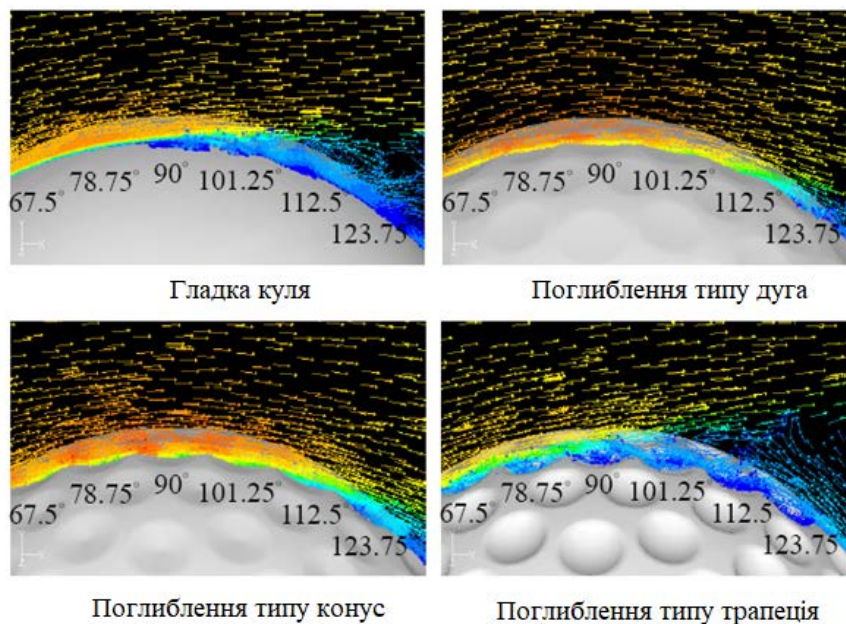


Рисунок 1.15 – Вектори швидкості з кутами $\theta = 67,5^\circ$ до $\theta = 135^\circ$ [15]

Вектори швидкості біля поверхні сфери і поряд з точкою відриву зображені на рисунку 1.16. Видно, що у всіх сфер потік відривається із зовнішнього боку поглиблення.

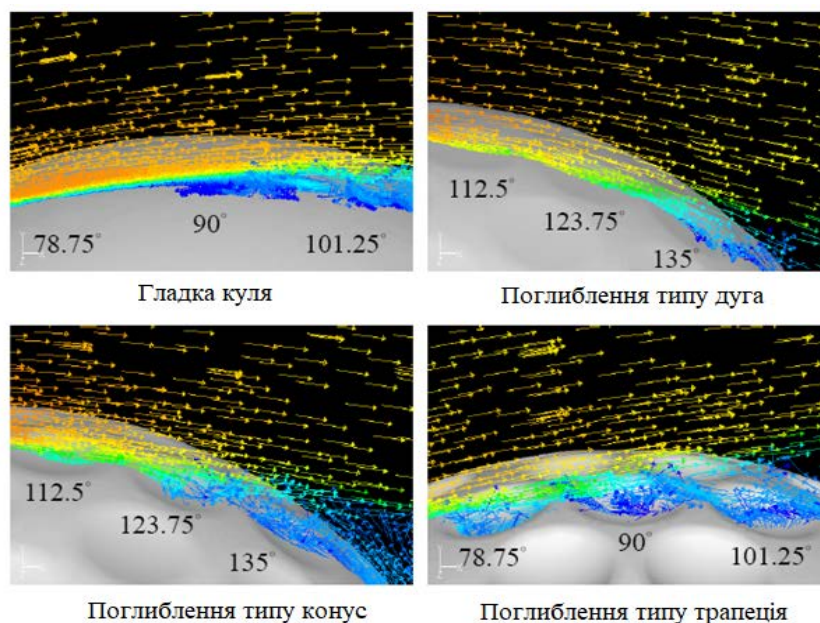


Рисунок 1.16 – Вектори швидкості поблизу точки відриву [15]

Для перевірки цього ефекту на суднах було створено масштабну модель реального судна, Кевін Джозеф Доннеллі [16], з розмірами $L=2,05$ м, $B=0,34$ м, $H=0,15$ м. На корпусі були створені лунки (рисунок 1.17), діаметри яких було розраховано як 7,4% діаметру кругової трюмної труби. Так як цей радіус приблизно 2,5 м, то діаметр лунки складає 0,37 м. Глибина лунки складає 11% від власного діаметру. Враховуючи коефіцієнт масштабування, діаметр та глибина лунок на моделі становлять 12,7 мм и 1,4 мм відповідно.

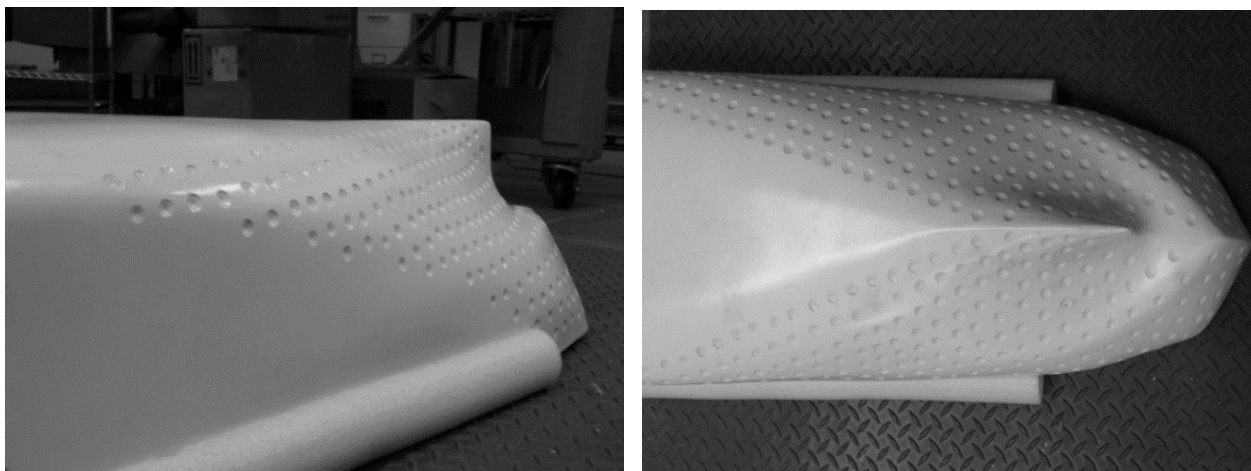


Рисунок 1.17 – Модель судна з виїмками на кормовій поверхні [16]

Але даний експеримент не показав бажаних результатів у зв'язку з тим, що моделювання судна по числу Re не є можливим, на відміну від м'яча для гольфу, через необхідність задавати об'єкту велику швидкість.

Встановлення лунок на поверхнях корпусів суден є не технологічним, в зв'язку з чим і виникає задача визначення оптимальних параметрів місцевих особливостей (виїмок), які зможуть давати помітне зниження опору в реальних умовах.

1.4 Огляд науково-дослідних робіт за темою

Аналізуючи наукові роботи, присвячені різним методам зниження опору різноманітних тіл та впливу на прикордонний шар, слід відзначити велику різноманітність інформації. Це й різні огляди, які мають описовий характер, і технічні звіти, і наукові статті, і матеріали конференцій. У той же час у вітчизняній і зарубіжній

літературі до сьогодні існує дуже мало систематизованих досліджень, які б комплексно висвітлювали всі питання в даному аспекті.

Серед робіт, присвячених методу удосконалення форми корпусу, слід відзначити роботи [17], [18], в яких було запропоновано чисельний метод для оптимізації гідродинамічної форми корпусу при рівномірному хвилюванні відносно вертикального руху бульба судна як єдину цільову функцію. Генетичний алгоритм поєднується з числовим методом для мінімізації пікових значень характеристик вертикального руху. Проект включає в себе зсув змінних основних розмірів (довжина, ширина і тяга). У порівнянні з початковим корпусом пікове значення вертикального руху поліпшеного корпусу зменшується на 30%. До роботи [19] було включене дослідження оптимізації гідродинамічних форм корпусу на основі параметричних моделей, створених F-Spline. Дві функціональні можливості F-Spline в контексті проекту судна були підтверджені за допомогою цього дослідження. Була визначена оптимізація форми корпусу, як один з основних напрямків суднотранспортної системи, де можна досягти значного поліпшення з точки зору економії палива, викидів CO_2 та безпеки на морі [20].

В закордонних роботах часто зустрічаються дослідження та досвід використання повітряного мастила [21-27]. Так, в роботі [28] було обґрунтовано економічний та екологічний вплив успішного впровадження повітряного мастила на судні з ALDR, споживання палива судном може бути зменшено на 5-20%. Слід відзначити, що цю методику розподіляють на три розділи, а саме: зменшення опору повітряних бульбашок (MDR), зниження товщини повітряного шару (ALDR) та зменшення часткової товщини порожнини (PCDR). Перша експериментальна робота з методом MDR представлена Маккорміком і Бхаттачарією (1973) [29]. Малі бульбашки були створені навколо повністю підводного корпусу за допомогою мідного дроту, який був обернутий навколо корпусу, що дозволило знизити опір на 30%. Це спричинило значні дослідження щодо зменшення опору повітряними бульбашками та плівками протягом останніх десятиліть (Мадаван та ін., 1985; Маркле і Деуч, 1992; Латорре, 1997;

Латорре та ін., 2003; Сандерс та ін., 2006; Елбінг та ін., 2008; Кеккіо, 2010). Випробування ін'єкцій мікробульбашок показали, що вони стають неефективними для низьких швидкостей за рахунок плавучості [30]. Зі збільшенням числа Рейнольдса в мікро-бульбашковому турбулентному прикордонному шарі зменшується показник зменшення опору. Отже, найбільший вплив ін'єкцій бульбашок на зменшення опору відбувається в певному діапазоні швидкостей. Відповідно до детальних досліджень та вивчених числових результатів, було виявлено три механізми, пов'язані зі зменшенням опору за допомогою бульбашок, які детально описуються в роботі [31]. По-перше, в якості додаткового джерела імпульсу, викликаного введенням повітряних бульбашок, збільшуючи нормальні швидкості води, виникає значне зменшення середніх швидкостей потоку, тим самим знижується коефіцієнт тертя поверхні вздовж стінки. По-друге, відбувається затухання турбулентності в районі поверхні стінки. По-третє, введення бульбашок створює тонку плівку рідини, що покриває всю стінку. Чим вище швидкість потоку введення газу, тим тонше плівка рідини, тим самим зменшується напруження зсуву і сила опору між водою і стінкою. За результатами експериментів [32], повітряні бульбашки, створені через пористий метал, які були введені у відносно швидкий турбулентний прикордонний шар, суттєво відрізняються в морській воді та прісній воді. Також було доведено, що відтворення впливу морської води в дослідницькому пристрої неможливе для прісної води з використанням менш агресивних розчинів солі або поверхнево-активних розчинів. При огляді публікацій про метод ALDR виявилось, що деякі дослідники вважають, що зменшення опору мікробульбашками є результатом потовщення прикордонного шару за рахунок збільшення в'язкості та зменшення щільності прикордонного шару. Так, у роботі Легнера (1984) [33] було зазначено, що зниження опору було отримано за рахунок комбінації модифікацій турбулентності та зменшення щільності. Збільшення інтенсивності турбулентності вільного потоку призводить до зниження опору і цей ефект є більш значний для більш високих коефіцієнтів щільності води, що описується в роботі [34]. Метод PCDR створює безперервний шар газового мастила, як метод

ALDR. Мультихвильова повітряна порожнина може бути розташована всередині нижнього пазу на корпусі судна, а однохвильова порожнина може бути розташована на дні швидкісного корпусу. Більш складні системи повітряно-порожнистих систем можуть бути застосовані на великих суднах та корпусах з невеликою площею ватерлінії. Детальне дослідження даного методу представлено в роботах Матвєєва І.К. [35], [36].

На сьогоднішній день, у зв'язку з серйозними екологічними обмеженнями, часто зустрічаються роботи та доповіді на конференціях з питань поліпшення шорсткості корпусу судна за допомогою використання протиобростаючого покриття [37], [38], [39]. В роботах [40], [41], [42] описуються перспективність та ефективність гідрофобних покриттів. Гідрофобні структури здатні залишатися сухими під водою протягом декількох днів шляхом захоплення шару повітря. Було виявлено, що використання поверхні, подібної до шкіри риб (з мікроканавками), призводить до зниження опору в турбулентному прикордонному шарі приблизно на 10%. Вони виступають в якості паркану проти розривів вихорів по ширині і тим самим зменшують поверхневі втрати зсуву та втрати імпульсу. Більш детально ця концепція викладена в роботах [43], [44], [45].

У зв'язку з тим, що традиційні шляхи оптимізації обводів швидкісних суден для заданої швидкості ходу на сьогоднішній день можуть вважатися майже вичерпаними, широко досліджується використання інтерцепторів, які значно покращують гідродинамічні характеристики суден. Чимало робіт присвячено експериментальним дослідженням моделей з інтерцепторами [46-49]. Було виявлено, що встановлення інтерцептора на зменшеній поверхні моделі однокорпусного швидкісного судна дає зменшення опору на 15%, а на моделі двокорпусного катамарану – на 12%. Вказана система показує хороший результат при малих хвилях, хоча переваги трохи менші для хвиль більш високої частоти. В роботі [50] пропонуються оптимальні розміри інтерцепторів у вигляді частки від довжини $h/L = 0,154\%$, які в цілому відповідають іншим опублікованим результатам. В доповідях на конференціях [51], [52] вказується,

що система інтерцепторів зменшує небажані кути диференту на великих швидкостях, збільшуючи швидкість до 4-5 вузлів, і в результаті отримується економія палива приблизно на 14%. В статті журналу [53] описуються не лише дослідження, а й їх практичне застосування.

На сьогоднішній день з'явилася нова тенденція з використанням поверхні м'яча для гольфу. При дослідженні м'яча для гольфу в CFD пакетах була отримана візуалізація потоку, яка демонструє, що точка відриву у м'яча для гольфа зміщується вниз за течією по відношенню до точки на гладкій кулі. Крім того, оскільки глибина виїмок стає глибшою в суперкритичній області, точка відриву зміщується вгору по потоку, а зона сліду стає більшою. Детальне вивчення впливу конфігурації виїмок на опір кулі описується в роботах [54], [55]. Поверхню з такою структурою почали досліджувати та використовувати в енергетичній галузі [56], [57] для збільшення теплопередачі поверхні. При використанні даної концепції на поверхні автомобіля було помічено зменшення споживання палива приблизно на 11% [58]. Були дослідженні та застосовані виїмки у велоспорті [59]. Були проведені експерименти з нанесенням виїмок на кормову поверхню моделі судна [16].

Виходячи з цього, сформульовані завдання наступних досліджень:

- Підтвердити ефективність зниження опору за допомогою місцевих особливостей поверхні канонічних тіл числовим методом.
- Визначити форму, розміри та місця розташування місцевих особливостей поверхні, що знижують опір різних типів суден та підводних човнів.
- Провести валідацію отриманих результатів розрахунків з фізичними експериментами.
- Зробити оцінку ефективності зниження опору за допомогою використання повітряного мастила з природньою подачею на днищову поверхню об'єкта.
- Сформулювати принципи та розробити схему розрахунку ефективності і окупності від впровадження заходів зниження опору.

Висновки по розділу 1. Узагальнюючи матеріали розділу, варто виділити наступні результати:

1. Проведено аналіз переваг і недоліків методів зниження опору суден. Вказана доцільність та перспективність кожного з методів для різних типів суден. Відзначено, що можливість їх використання в кожному конкретному випадку необхідно перевіряти обґрунтованою комплексною оцінкою характеристик суден різного призначення.

2. Виконано огляд наукової літератури за результатами якого узагальнено досвід розробок та експлуатації засобів зниження опору суден. Обрано 2 основні напрямки дослідження в зниженні опору суден та об'єктів океанотехніки. Перший – це встановлення місцевих особливостей на поверхні об'єкту, що сприяють перерозподілу тиску та зменшенню ширини гідродинамічного сліду. Другий – це використання повітряного мастила без встановлення нагнітального приладу.

3. Ретельно розглянуто оригінальний засіб зниження опору за допомогою використання місцевих особливостей (лунок) на поверхні м'яча для гольфу. Спроба розміщення таких лунок на кормовій частині моделі корпусу судна не показала бажаних результатів у зв'язку з тим, що моделювання судна по числу Re не є можливим, на відміну від м'яча для гольфу, через необхідність задавати об'єкту дуже велику швидкість.

РОЗДІЛ 2

АЛГОРИТМ ПОБУДОВИ РОЗРАХУНКОВИХ ПРОЕКТІВ В CFD КОМПЛЕКСАХ ТА ПРОЦЕСИ ВАЛІДАЦІЇ ТА ВЕРИФІКАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ

2.1 Порядок та основні принципи побудови розрахункових проектів в CFD комплексі Flow Vision

Програмний комплекс Flow Vision відноситься до CFD CAE систем, що забезпечує розв'язування задач гідрогазо- і термодинаміки і складається з трьох модулів, а саме: препроцесор, солвер та постпроцесор. Першим кроком створення розрахункового проекту є побудова 3D моделі розрахункової області та одного або декількох твердотільних елементів в зовнішній CAD системі, наприклад в SolidWorks, і які зберігаються в форматах *.wrl, чи *.stl.

Завантаження 3D моделі розрахункової області в програмний комплекс Flow Vision здійснюється за допомогою команди "Создать" (тут і далі мовою інтерфейсу Flow Vision). Якщо немає помилок у геометрії, то наступним кроком буде робота в препроцесорі по вибору математичної моделі. В "Подобласти", де рухається рідина (на рис. 2.1 – це "Подобласть 2"), обираємо модель "Несжимаемая жидкость".

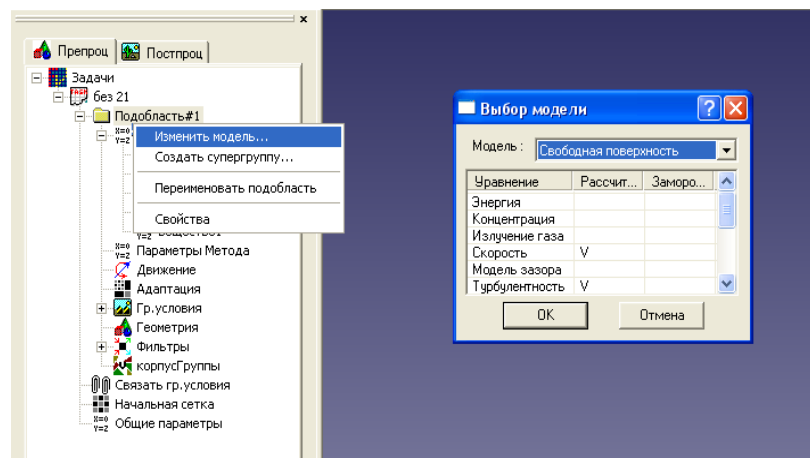


Рисунок 2.1 – Вибір математичної моделі руху рідини

Взагалі рух нестисливої рідини описується диференціальними рівняннями в напруженнях в наступному вигляді:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} v_x + \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} v_y + \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} v_z = \vec{\Phi} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \vec{p}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{p}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{p}_z}{\partial z} \right); \quad (2.1)$$

$$\nabla \vec{v} = 0,$$

де $\vec{v}(x, y, z, t) = \vec{i}v_x(x, y, z, t) + \vec{j}v_y(x, y, z, t) + \vec{k}v_z(x, y, z, t)$ – вектор швидкості; v_x, v_y, v_z – проекції вектору швидкості на координатні вісі з відповідними одиничними векторами $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$; $\vec{\Phi}(x, y, z, t)$ – вектор напруженості масових сил; ρ – густина (питома маса) рідини; $\vec{p}_x(x, y, z, t), \vec{p}_y(x, y, z, t), \vec{p}_z(x, y, z, t)$ – складові векторів напруженості поверхневих сил, що діють на площадки, які розташовані перпендикулярно вісям x, y, z і створюють тензор нормальних і дотичних напружень:

$$\begin{vmatrix} p_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & p_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & p_{zz} \end{vmatrix}; \tau_{yx} = \tau_{xy}; \tau_{zx} = \tau_{xz}; \tau_{yz} = \tau_{zy} \quad (2.2)$$

$\nabla \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}$ – дивергенція вектору швидкості.

Далі, за Рейнольдсом, будемо вважати, що вектори швидкості $\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}''$ та поверхневого напруження $\vec{p}_n = \vec{p}_n' + \vec{p}_n''$ складаються за часом з повільної та пульсаційної складових, а $\vec{p}_n = \vec{p}_x \cos(n, x) + \vec{p}_y \cos(n, y) + \vec{p}_z \cos(n, z)$, де n – нормаль до поверхневої площадки. Таким чином, рівняння руху приймає вигляд:

$$\frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} + \frac{\partial \vec{v}'}{\partial x} v'_x + \frac{\partial \vec{v}'}{\partial y} v'_y + \frac{\partial \vec{v}'}{\partial z} v'_z = \vec{\Phi} + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial (\vec{p}_x' + \vec{p}_x'')}{\partial x} + \frac{\partial (\vec{p}_y' + \vec{p}_y'')}{\partial y} + \frac{\partial (\vec{p}_z' + \vec{p}_z'')}{\partial z} \right];$$

$$\vec{v}' = 0, \quad (2.3)$$

де, за узагальненою гіпотезою Ньютона, повільні складові поверхневих напружень визначаються формулами:

$$p'_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial v'_x}{\partial x}; p'_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial v'_y}{\partial y}; p'_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial v'_z}{\partial z};$$

$$\tau'_{xy} = \tau'_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v'_y}{\partial x} + \frac{\partial v'_x}{\partial y} \right); \tau'_{xz} = \tau'_{zx} = \mu \left(\frac{\partial v'_z}{\partial x} + \frac{\partial v'_x}{\partial z} \right); \quad (2.4)$$

$$\tau'_{yz} = \tau'_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v'_y}{\partial z} + \frac{\partial v'_z}{\partial y} \right),$$

в яких $p(x,y,z,t)$ - тиск в рідині, а μ – динамічний коефіцієнт в'язкості.

Пульсаційні складові поверхневих напружень пов'язані з відповідними складовими швидкостей наступними формулами:

$$\begin{aligned} p''_{xx} &= -\rho \overline{v''_x v''_x}; \quad p''_{yy} = -\rho \overline{v''_y v''_y}; \quad p''_{zz} = -\rho \overline{v''_z v''_z} \\ \tau''_{xy} &= \tau''_{yx} = -\rho \overline{v''_x v''_y}; \quad \tau''_{xz} = \tau''_{zx} = -\rho \overline{v''_x v''_z}; \quad \tau''_{zy} = \tau''_{yz} = -\rho \overline{v''_z v''_y} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Далі, за гіпотезою Бусінеска, ці складові визначаються як:

$$\begin{aligned} p''_{xx} &= -\frac{2}{3}\rho k + 2\mu_T \frac{\partial v'_x}{\partial x}; \quad p''_{yy} = -\frac{2}{3}\rho k + 2\mu_T \frac{\partial v'_y}{\partial y}; \quad p''_{zz} = -\frac{2}{3}\rho k + 2\mu_T \frac{\partial v'_z}{\partial z} \\ \tau''_{xy} &= \tau''_{yx} = \mu_T \left(\frac{\partial v'_y}{\partial x} + \frac{\partial v'_x}{\partial y} \right); \quad \tau''_{xz} = \tau''_{zx} = \mu_T \left(\frac{\partial v'_z}{\partial x} + \frac{\partial v'_x}{\partial z} \right); \\ \tau''_{zy} &= \tau''_{yz} = \mu_T \left(\frac{\partial v'_z}{\partial y} + \frac{\partial v'_y}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (2.6)$$

де k – кінетична енергія турбулентності, а μ_T – коефіцієнт турбулентної в'язкості, що визначаються обраною моделлю турбулентності. Наприклад, для так званої стандартної $k - \varepsilon$ моделі вони визначаються наступними формулами [60], де ε – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності.

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}' k) &= \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \mu_T G - \rho \varepsilon; \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}' \varepsilon) &= \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_T G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \end{aligned} \quad (2.8)$$

де $G = D_{ij} \frac{\partial v'_i}{\partial x_j}$; $D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left(\nabla \vec{v}' + \frac{\rho k}{\mu_T} \right) \delta_{ij}$; $S_{ij} = \frac{\partial v'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v'_j}{\partial x_i}$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$;

$C_\mu = 0,09$; $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$.

Таким чином, рівняння (2.3 – 2.8) створюють замкнену систему рівнянь, що описують рух нестисливої рідини. До речі, в програмному комплексі FlowVision реалізовано 7 моделей турбулентності, вибір яких входить до процесу побудови розрахункового проекту і залежить від особливостей задач, що розв'язуються.

Параметри моделі розділені на дві групи: фізичні параметри моделі та параметри методу розрахунку. У дереві вони представлені елементами: фізичні параметри та параметри методу. Причому фізичні параметри розділені ще на 5 підгруп: початкові та опорні значення змінних, константи, які входять у рівняння математичної моделі, властивості речовин (рис. 2.2).

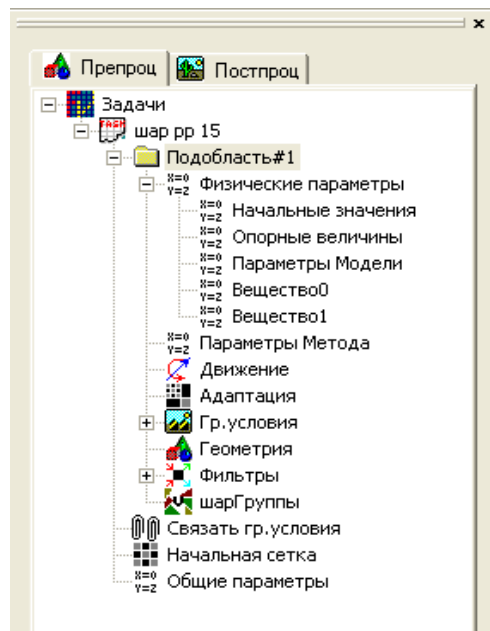


Рисунок 2.2 – Рабочая область

Далі у вікні "Начальные значения" задаються параметри для усієї розрахункової області, такі як температура, концентрація, тиск та швидкість (рис. 2.3).

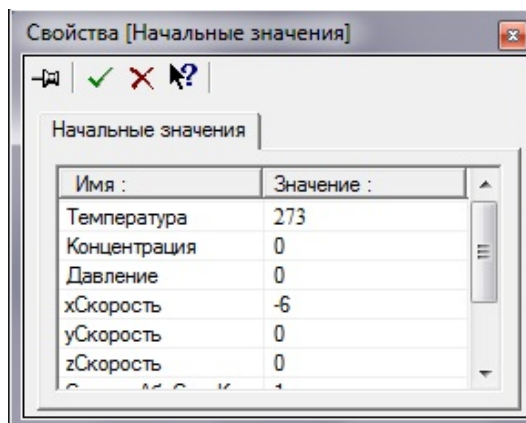


Рисунок 2.3 – Вікно початкових значень

У вікні "Опорные величины" задаються параметри, які обирають шкалу для температури та тиску (рис. 2.4).

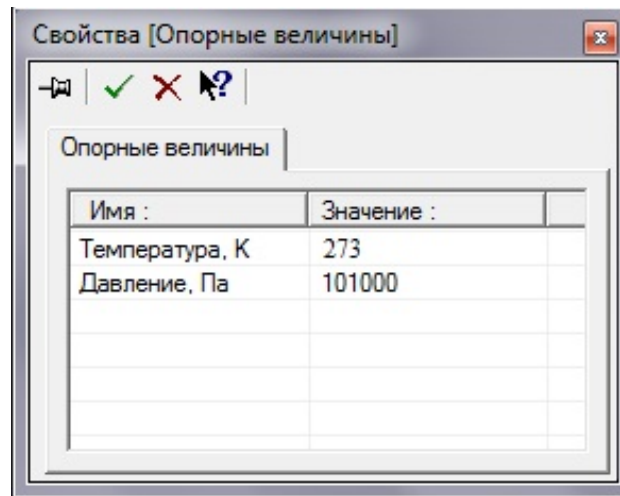


Рисунок 2.4 – Вікно опорних величин

Температуру і тиск використовуємо як опорні величини. У Flow Vision ці змінні представлені відносним значенням. Абсолютні значення визначаються за формулою:

$$f_a = f + f_{ref} , \quad (2.9)$$

де f_a – абсолютне значення змінної; f – розрахункові відносні значення змінної; f_{ref} – опорні величини.

У вікні "Загрузка вещества из базы" обираємо розрахункову речовину. В нашій роботі ми використовуємо дві основні речовини: "Воздух" або "Вода (чистая)" (рис. 2.5):

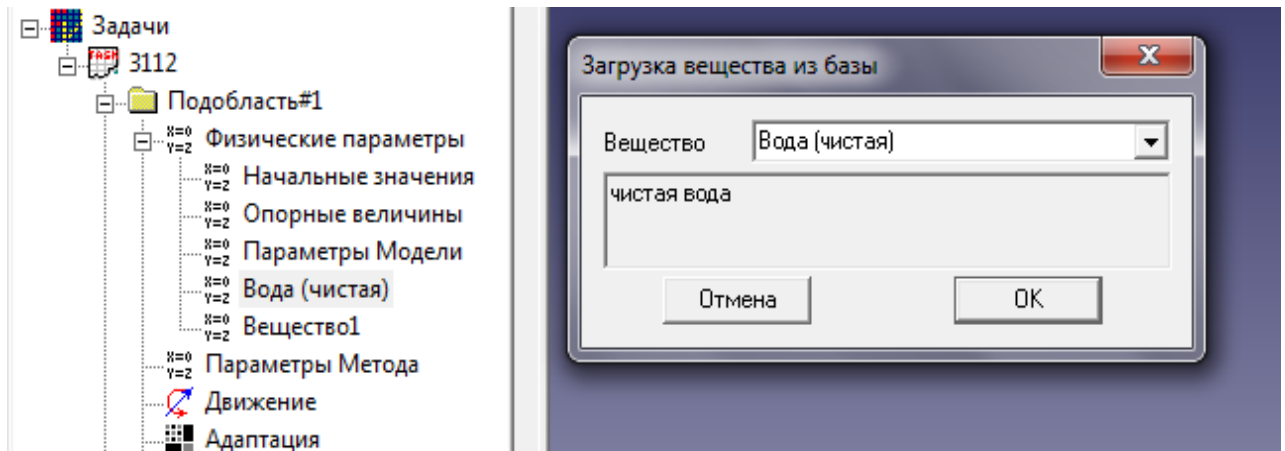


Рисунок 2.5 – Вибір розрахункової речовини

У розділі "Параметры модели" задається густина середовища та висота рівня рідини, якщо в цьому є необхідність (рис. 2.6):

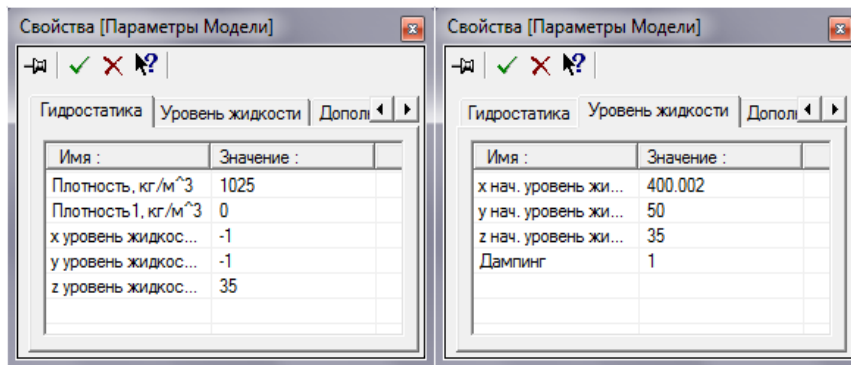


Рисунок 2.6 – Параметри моделі

Точність числового розрахунку рівняння конвективного переносу сильно залежить від орієнтації потоку рідини відносно розрахункової сітки. Для підвищення ступеня точності в розділі "Загальні параметри" за рахунок КФЛ (явне число Куранта-Фрідрікса-Леві) ми можемо обирати ступінь адаптації в процесі розрахунку. Також в цьому розділі можна задавати період збереження проекту та робити інші налаштування розрахунку (рис. 2.7):

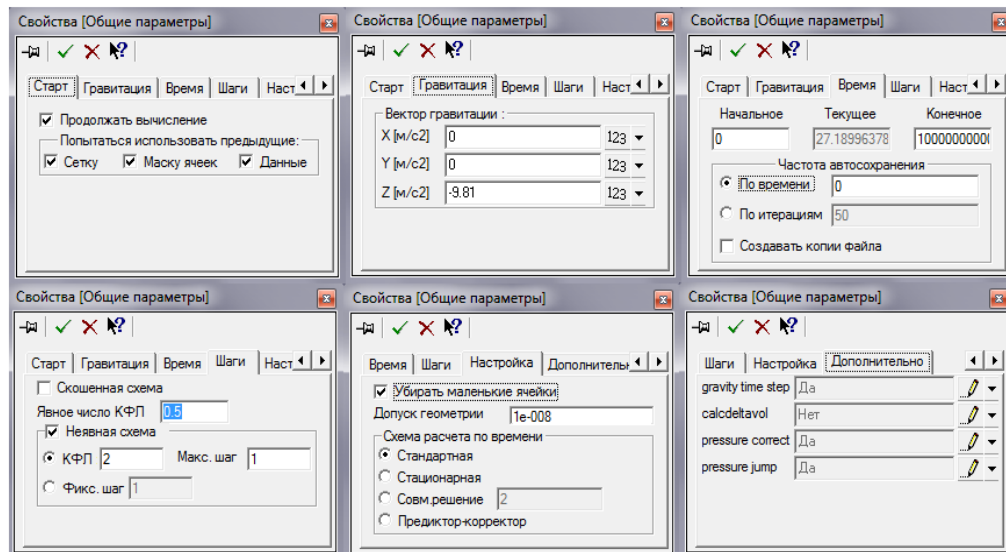


Рисунок 2.7 – Загальні параметри

Умова стійкості алгоритму. При використанні явної схеми ($\sigma=0$), нехай τ_k – мінімальний прогоновий час клітинки, яка визначається як мінімальне відношення характерного розміру клітинки до модуля швидкості в клітинці за всіма клітинками даної підобласті. Тоді умову стійкості можна сформулювати так: проводити розрахунки по явній схемі можна лише при кроках τ , задовольняючи умову:

$$CFL = \frac{\tau}{\tau_k} \leq 1 . \quad (2.10)$$

Вибір кроку інтегрування по часу τ виконується за однією з умов:

$$\tau = \min(CFL \cdot \tau_k, \tau_{max}) \quad (2.11)$$

$$\tau = \tau_{own} , \quad (2.12)$$

де CFL – стала; τ_{max} – максимальний крок по часу; τ_{own} – заданий крок по часу.

В даній роботі використовується метод кінцевих об'ємів, який застосовується для опису течії як нестисливої, так і стисливої рідини. Відповідно до метода кінцевих об'ємів, просторова дискретизація задачі здійснюється шляхом розбиття розрахункової області на невеликі дотичні обсяги, для кожного з яких записується рівняння. Всередині кожного контрольного об'єму знаходиться одна (і тільки одна) точка "прив'язки" шуканого сіткового рішення. У більшості розробок, орієнтованих на рішення тривимірних задач для областей складної геометрії, в якості контрольного об'єму використовуються клітинки розрахункової сітки: вузли сітки розташовуються у вершинах багатогранника сіткові лінії та йдуть уздовж його ребер, а значення шуканих величин приписуються геометричному центру клітинки. Даний метод зводить задачу до системи алгебраїчних, взагалі кажучи, нелінійних рівнянь. Ці рівняння вирішуються солвером за унікальним алгоритмом, який був розроблений фірмою "TESIS".

Третя частина – це постпроцесор, докладний опис якого приведений в частині 4.1 на конкретному прикладі корпусу судна.

Для кожного окремого дослідження необхідно виконувати додаткові операції та встановлювати більше умов та параметрів для отримання точних результатів.

2.2 Порядок та основні принципи побудови розрахункових проектів в CFD комплексі Solid Works Flow Simulation

Програмний комплекс Solid Works Flow Simulation – це потужний інструмент обчислювальної гідродинаміки (CFD), який повністю вбудований в SOLIDWORKS. Він дозволяє моделювати ефекти потоку і гідродинамічних сил, які критично важливі

для успішного проектування. Solid Works Flow Simulation дозволяє моделювати потоки рідини і газу в умовах реального світу, запускати сценарії "що, якщо" і ефективно аналізувати наслідки потоку рідини і пов'язаних сил, що діють на об'єкт. При вирішенні також можна швидко порівнювати варіанти проекту, щоб оптимізувати прийняття рішень і створювати більш ефективні об'єкти [61-63]. Цей потужний інструмент для тривимірного моделювання підтримує симуляцію низькошвидкісних і надзвукових потоків, забезпечуючи паралельне проектування і дозволяючи кожному інженеру радикально змінити аналіз потоку рідини і теплообміну. Крім Solid Works Flow Simulation проектувальники можуть моделювати ефекти вентиляторів і обертових компонентів в потоці, а також нагрівання та охолодження компонентів. Так як в описі програмного продукту Solid Works немає інструкції щодо створення та роботи з вільною поверхнею, методом спроб та помилок було розроблено технологію моделювання обтікання тіла з вільною поверхнею, яка представлена нижче.

Першим кроком створення розрахункового проекту є побудова 3D моделі в CAD системі Solid Works. На відміну від Flow Vision, нам не потрібно експортувати модель до іншої програми, а просто переходимо у розділ Flow Simulation і починаємо створювати проект за допомогою команди "Wizard" (тут і далі мовою інтерфейсу Flow Simulation) (рис. 2.8 – 2.9)

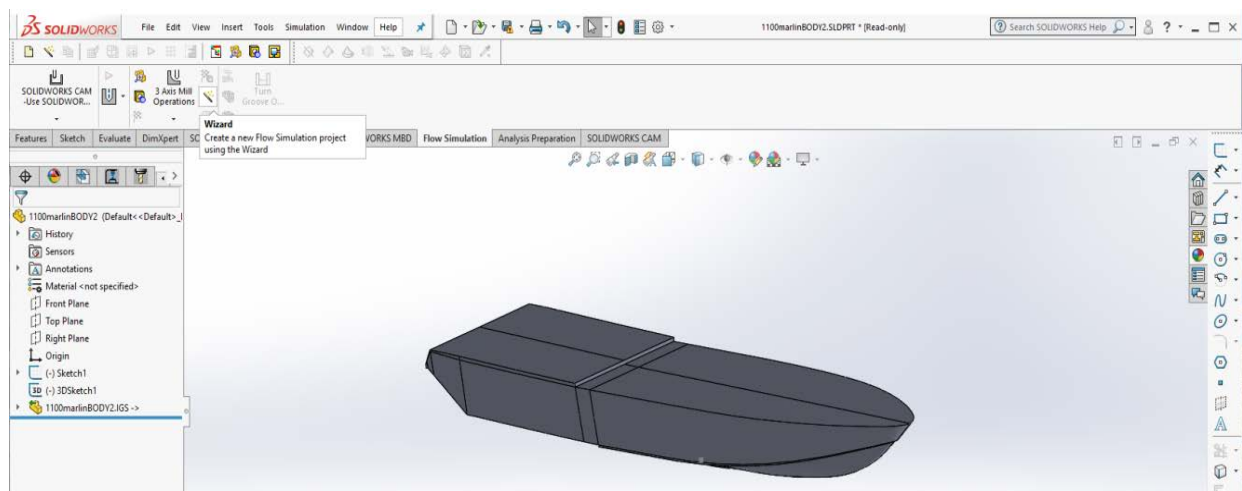


Рисунок 2.8 – Початок створювання проекту

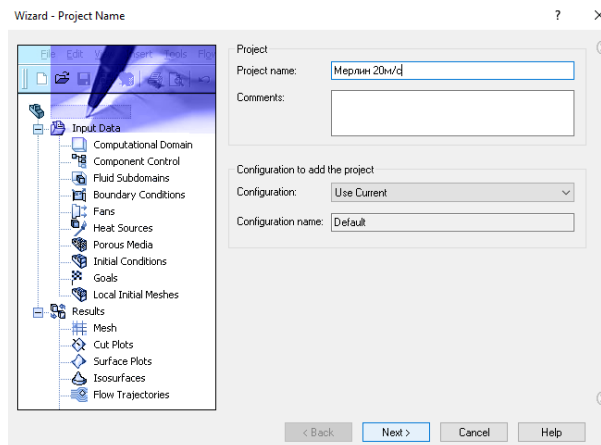


Рисунок 2.9 – Початкове вікно розділу "Wizard"

Далі у вікні "Units system" обирається система одиниць з бази даних для введення параметрів дослідження та отримання результатів (рис. 2.10).

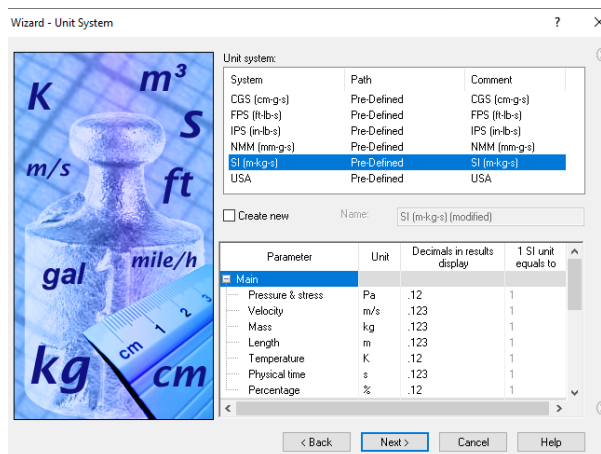


Рисунок 2.10 – Вікно вибору системи одиниць

Наступним кроком у вікні "Analysis type" обирається тип аналізу та конкретні параметри фізичних функцій для нашої задачі, яку ми будемо вирішувати за допомогою Flow Simulation. Пропонується два типи аналізу: аналіз внутрішньої або зовнішньої задачі. До внутрішніх задач відноситься аналіз потоку, який обмежений зовнішніми твердими поверхнями, наприклад, течія всередині трубопроводу, резервуару, будівлі тощо. До зовнішньої задачі відноситься аналіз потоку, який не обмежений твердими поверхнями, а лише границями обчислювальної області. В цьому випадку твердотільна модель повністю оточена потоком, наприклад, над літаком, автомобілем, судном тощо. У випадку, коли є необхідність вирішувати

одночасно і внутрішню, і зовнішню задачу, тоді у програмному комплексі Flow Simulation розраховується зовнішня задача. Два параметри "Exclude internal spaces" та "Exclude cavities without flow conditions", у випадку нашого окремо взятого дослідження, не впливають на модель, проте дозволяють уникнути непотрібних уточнень сітки та розрахунків потоку в областях моделі, які не потребують аналізу. Також у даному вікні ми вказуємо фізичний час аналізу та крок по часу для отримання результатів, параметри сили тяжіння. Відмічаємо, що буде виконуватися розрахунок для вільної поверхні, тобто, для двох не змішувальних рідин (рис. 2.11).

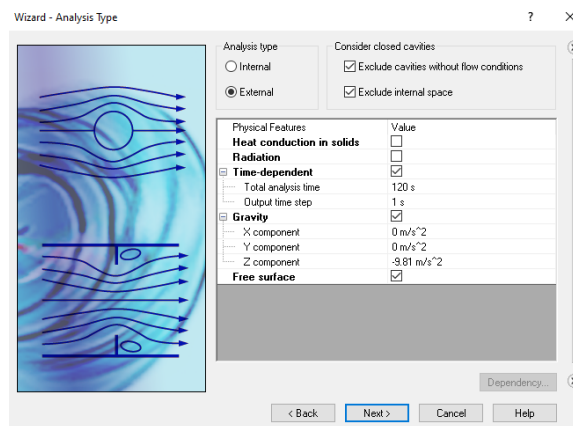


Рисунок 2.11 – Вікно вибору типу аналізу та фізичних параметрів

В наступному вікні "Default Fluid" ми вказуємо дві робочі рідини: вода та повітря (рис. 2.12).

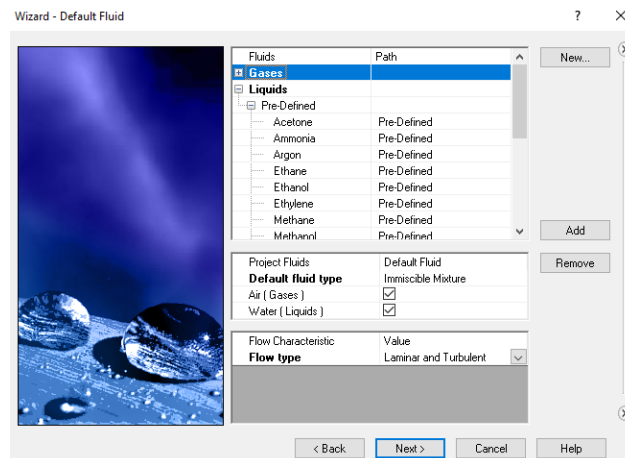


Рисунок 2.12 – Вікно вибору робочої рідини

Наступним кроком є надання значень термодинамічних параметрів, параметрів швидкості, параметрів турбулентності та концентрації у вікні "Initial and Ambient

Conditions" (рис. 2.13 – 2.14). Для того, щоб уникнути проблем в розрахунках через ударну хвилю набігаючого потоку, швидкість потоку задається поступово, тобто швидкість потоку збільшується в залежності від фізичного часу розрахунку. Так як ми моделюємо потік двох не змішувальних рідин із вільною поверхнею, необхідно вказати початковий розподіл рідини.

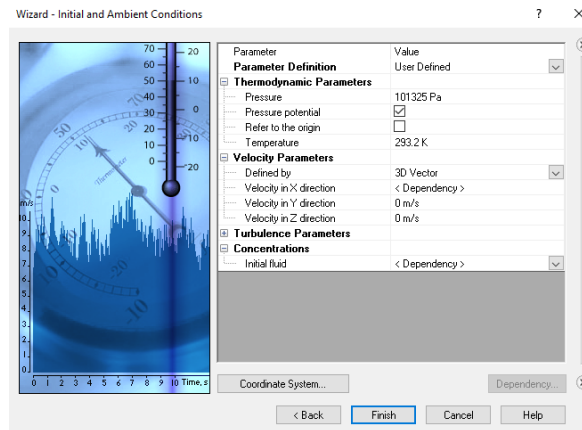


Рисунок 2.13 – Вікно визначення початкових та навколишніх умов

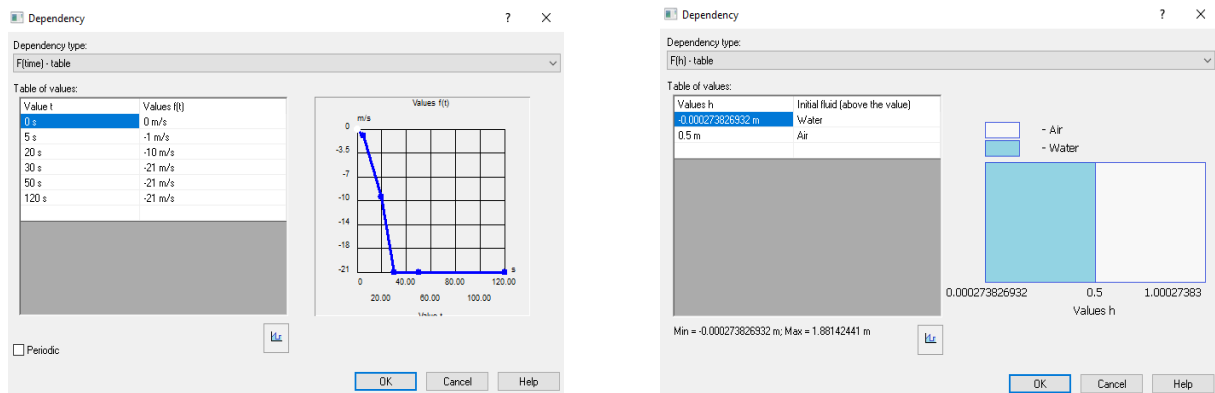


Рисунок 2.14 – Вікно уточнення початкових умов

Для отримання коректних результатів моделювання переходимо в вікно "Calculation Control Options". Необхідно уважно виставити усі потрібні параметри збереження результатів моделювання. Зазвичай, фізичний момент завершення розрахунку вказується для задач, які залежать від часу, а для задач, які потребують встановленого режиму, розрахунок може бути завершений, коли програма прорахує встановлений режим. Так як для нашого дослідження необхідна часова послідовність результатів розрахунку для контролю проміжних результатів через можливість

виникнення ненормального завершення розрахунку, ми вказуємо моменти збереження результатів під час розрахунку (рис. 2.15).

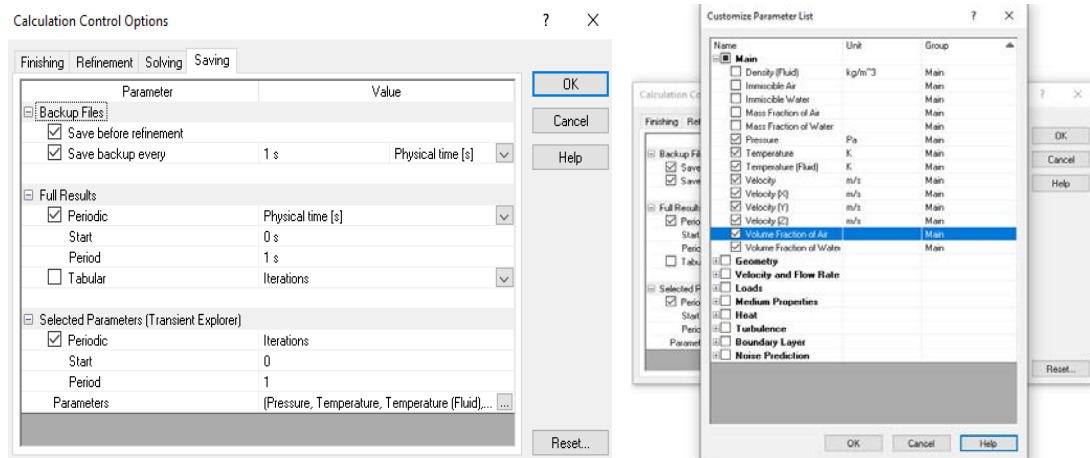


Рисунок 2.15 – Вікно параметрів керування розрахунків та налаштування списку параметрів

Вікно "Global Goals" дозволяє вказати глобальні цілі проекту, де глобальна ціль – це фізичний параметр, який розраховується по всій обчислювальній області (рис. 2.16). Зазначення цілі не тільки запобігає виникненню помилок при розрахунках значень даної цілі, але й у більшості випадків дозволяє скоротити загальний час розрахунку. Можна відстежувати поведінку вказаної цілі під час розрахунку, що дозволяє вручну зупинити процес розрахунку, якщо в подальшому уточнені цілі немає потреби. До програмного продукту Flow Simulation вмонтовано індикатор виконання цілі, який представляє собою якісну та кількісну характеристику процесу збіжності цілі. Коли Flow Simulation аналізує збіжність цілі, вона обчислює амплітудне відхилення цілі (Δ) за інтервал аналізу, що рахується з останньої ітерації, і порівнює Δ з критерієм збіжності обраної нами цілі.

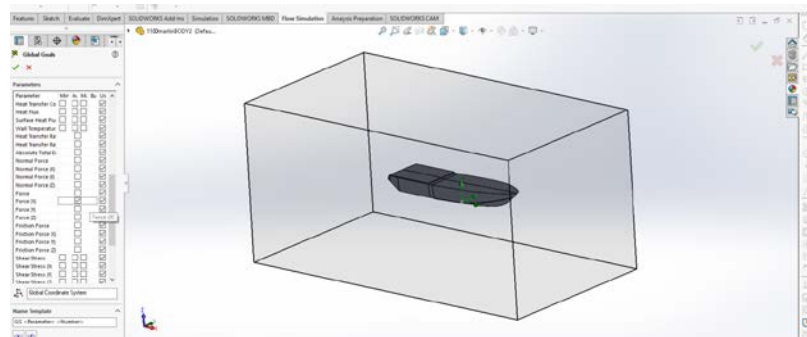


Рисунок 2.16 – Виставлення цілі розрахунку

Одним з найважливіших процесів проектування в програмному продукті Flow Simulation є заповнення вікна "Global Mesh" (рис. 2.17), тобто встановлення розрахункової сітки. Даний процес можна виконувати двома способами: автоматичним чи ручним. Автоматичний спосіб керує початковою сіткою, задаючи рівень початкової сітки, що регулює кількість базових клітинок сітки та процедуру очищення сітки у вузьких каналах моделі. Даний спосіб підходить для дослідження гладких моделей без врахування дрібних елементів. Ручний спосіб дозволяє робити більш детальною базову сітку, з урахуванням вузьких каналів та особливостей форми об'єкту, а також задавати уточнення розрахункової сітки відносно окремо обраної речовини або об'єкта.

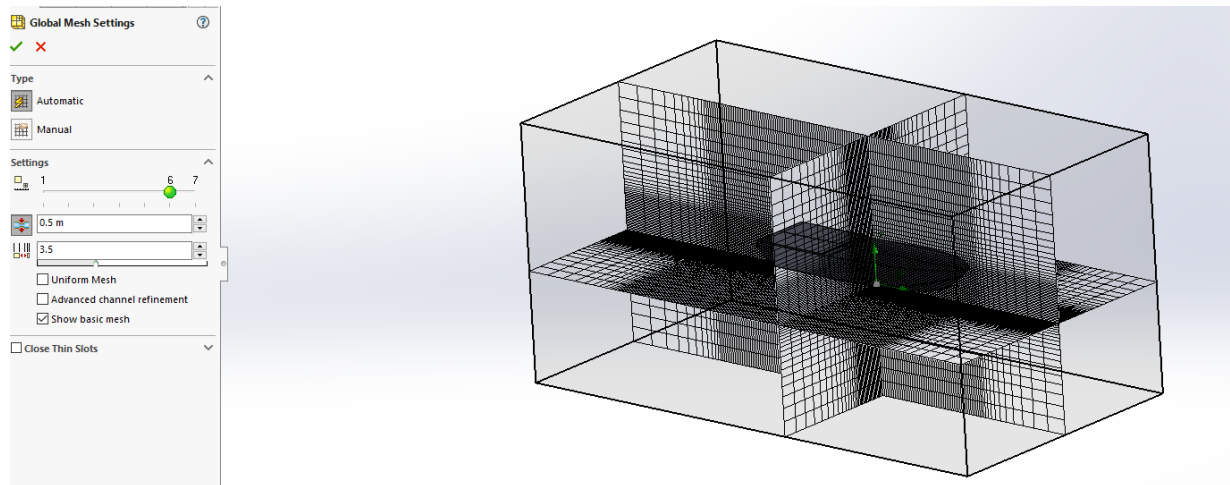


Рисунок 2.17 – Виставлення цілі розрахунку

Слід зазначити, що математична модель в програмних комплексах Flow Vision і Flow Simulation ідентична, тому математичну модель Flow Simulation можна подивитися у розділі 2.1.

Після виконання усіх вимог можна приступати до розрахунку. Результатом розрахунку буде обчислення опору руху води судна в напрямку вісі OX, яке можна знайти в вікні "Solver" (рис. 2.18). За допомогою даного вікна можна спостерігати за процесом розрахунку, що дозволяє призупинити чи зупинити обчислення, вручну ініціювати вдосконалення існуючої обчислювальної сітки, змінити параметри управління обчисленнями та відобразити поточні результати під час розрахунку.

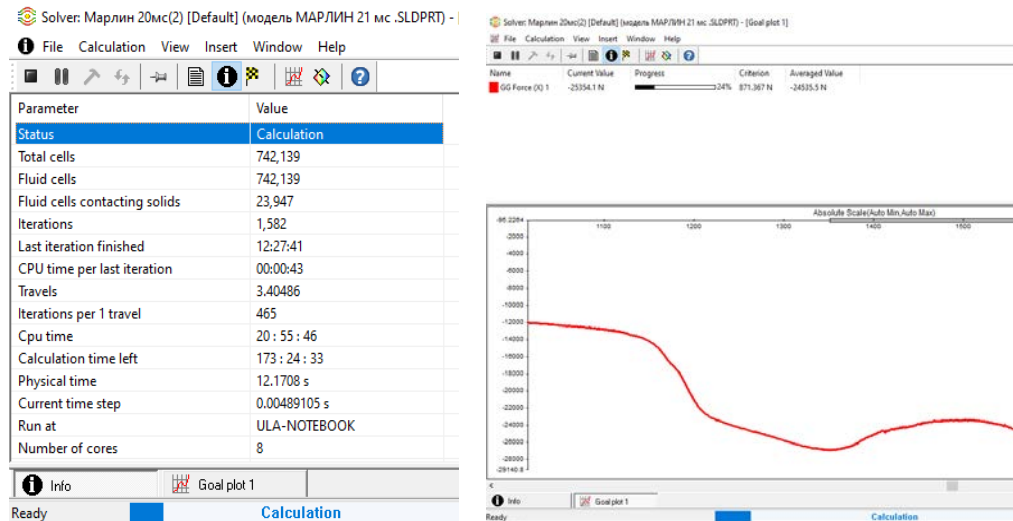


Рисунок 2.18 – Вікно моніторингу розрахунків

Після завершення розрахунків переходимо в постпроцесор для отримання результатів. В розділі "Cut Plots" ми можемо обрати ділянку, по якій задаємо параметр дослідження (рис. 2.19 –2.20).

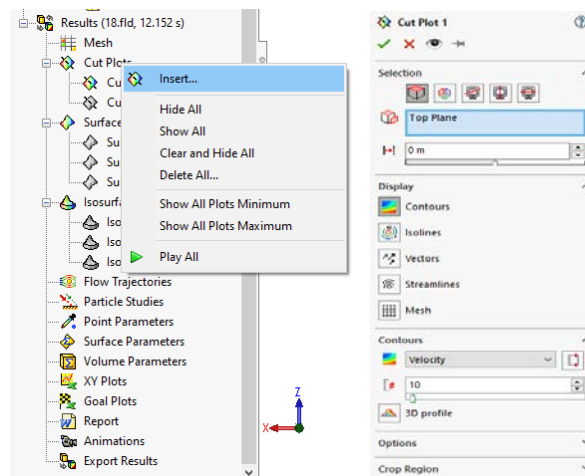


Рисунок 2.19 – Вибір параметра дослідження на ділянці

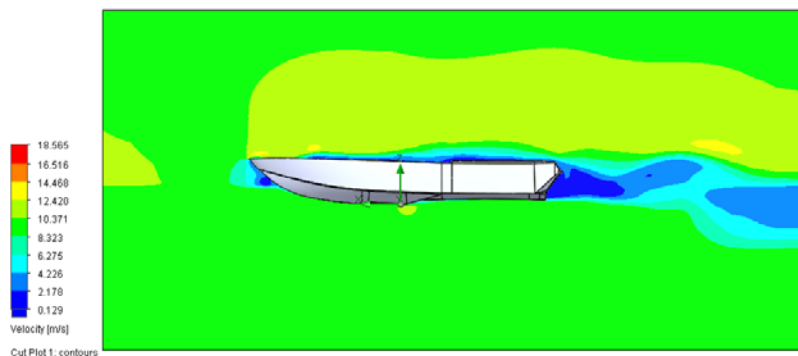


Рисунок 2.20 – Візуалізація розподілу швидкості вздовж поверхні катера

В розділі «Surface Plots» обирається поверхня для вивчення розподілу тиску (рис. 2.21 – 2.22).

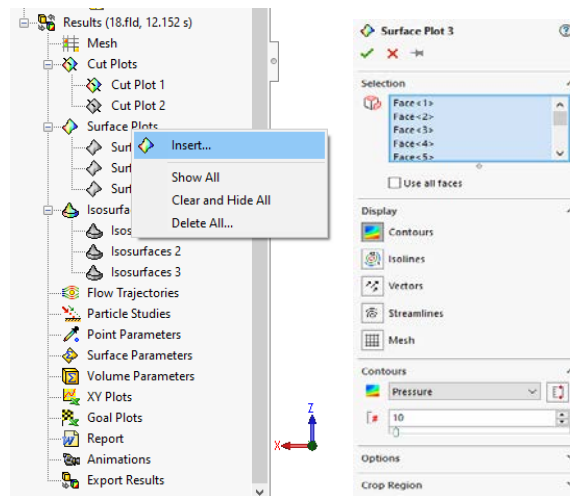


Рисунок 2.21 – Вибір параметра дослідження на поверхні

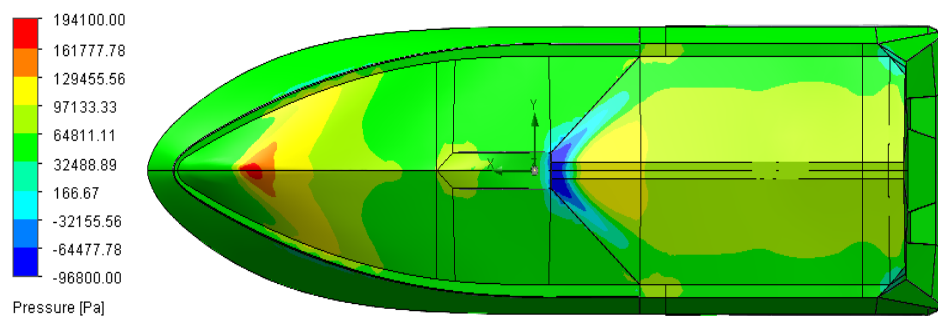


Рисунок 2.22 – Візуалізація дослідження розподілу тиску на поверхні катера

Для створення візуалізації поверхні рідини, що обтікає поверхню катера під час руху, в розділі «Isosurfaces» обираються параметри поверхні рідини (рис. 2.23 – 2.24).

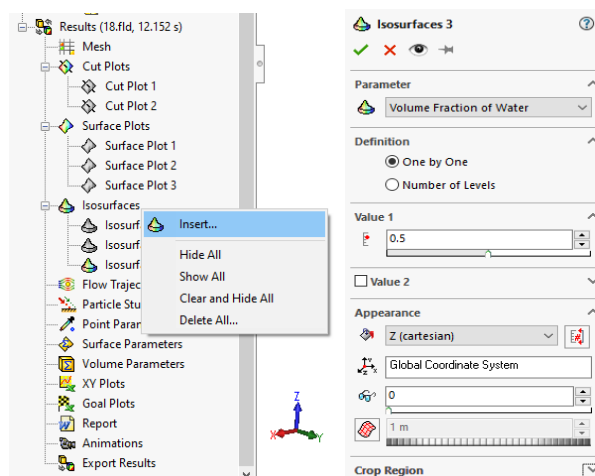


Рисунок 2.23 – Вибір параметра дослідження на поверхні

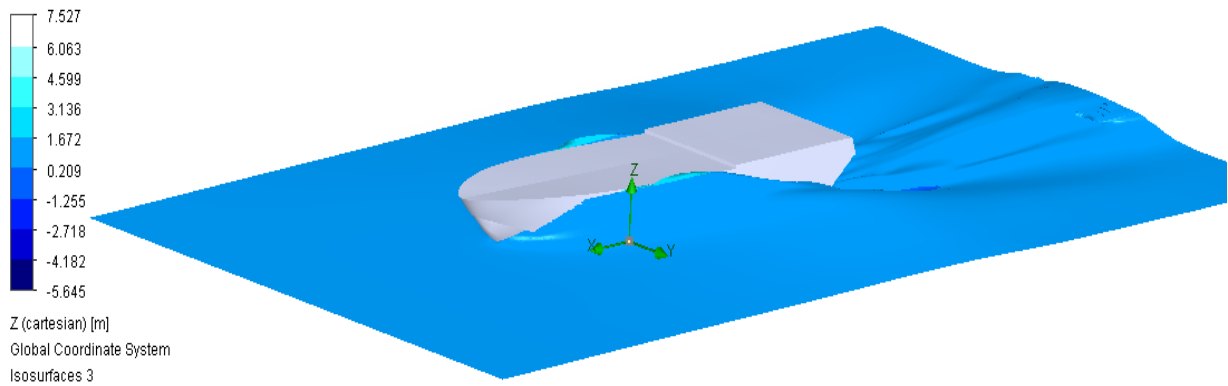


Рисунок 2.24– Візуалізація дослідження розподілу тиску на поверхні катера

Для кожного окремого дослідження необхідно виконувати додаткові операції та встановлювати більше умов та параметрів для отримання точних результатів.

2.3 Особливості вибору параметрів для верифікації та валідації розрахунків

В сучасному світі програмні комплекси (CFD) є одним з найпотужніших інструментів, який використовується майже усіх видах діяльності людства, для забезпечення ефективних та рентабельних результатів роботи. Використання часу та коштів на проведення фізичних експериментів для кожної частини проекту не є ефективним. При використанні CFD технологій можна виконати суттєво більший обсяг досліджень за менший проміжок часу та менші кошти. Однак, склалася думка, що всі результати CFD досліджень повинні бути підтверджені у фізичному експерименті. Модельний експеримент довгий час був єдиним джерелом отримання гідродинамічних характеристик об'єктів проектування. Наприкінці 19 століття з'явилися нові технології CFD моделювання і зусиль вчених та проектних організацій були зосереджені на верифікації CFD технологій шляхом порівняння числових та фізичних експериментів. В наш час можна вважати, що цей період закінчився. Настає новий період коли CFD технології використовуються для натурних об'єктів і верифікацію необхідно проводити результатів натурних випробувань з результатами числових розрахунків для цих об'єктів.

Для підтвердження коректності та правильності розрахунків виконуються процеси верифікації та валідації обраної моделі. Хоча зазвичай ці два процеси взаємо

замінюються, але насправді вони представляють собою різні концепції, досліджуючи точність та коректність числових експериментів з різних точок зору. Взаємодія даних процесів схематично представлена на рисунку 2.25 [64], в якому ліва частина схеми відноситься до галузі математичного моделювання, а права - до галузі фізичного експерименту.

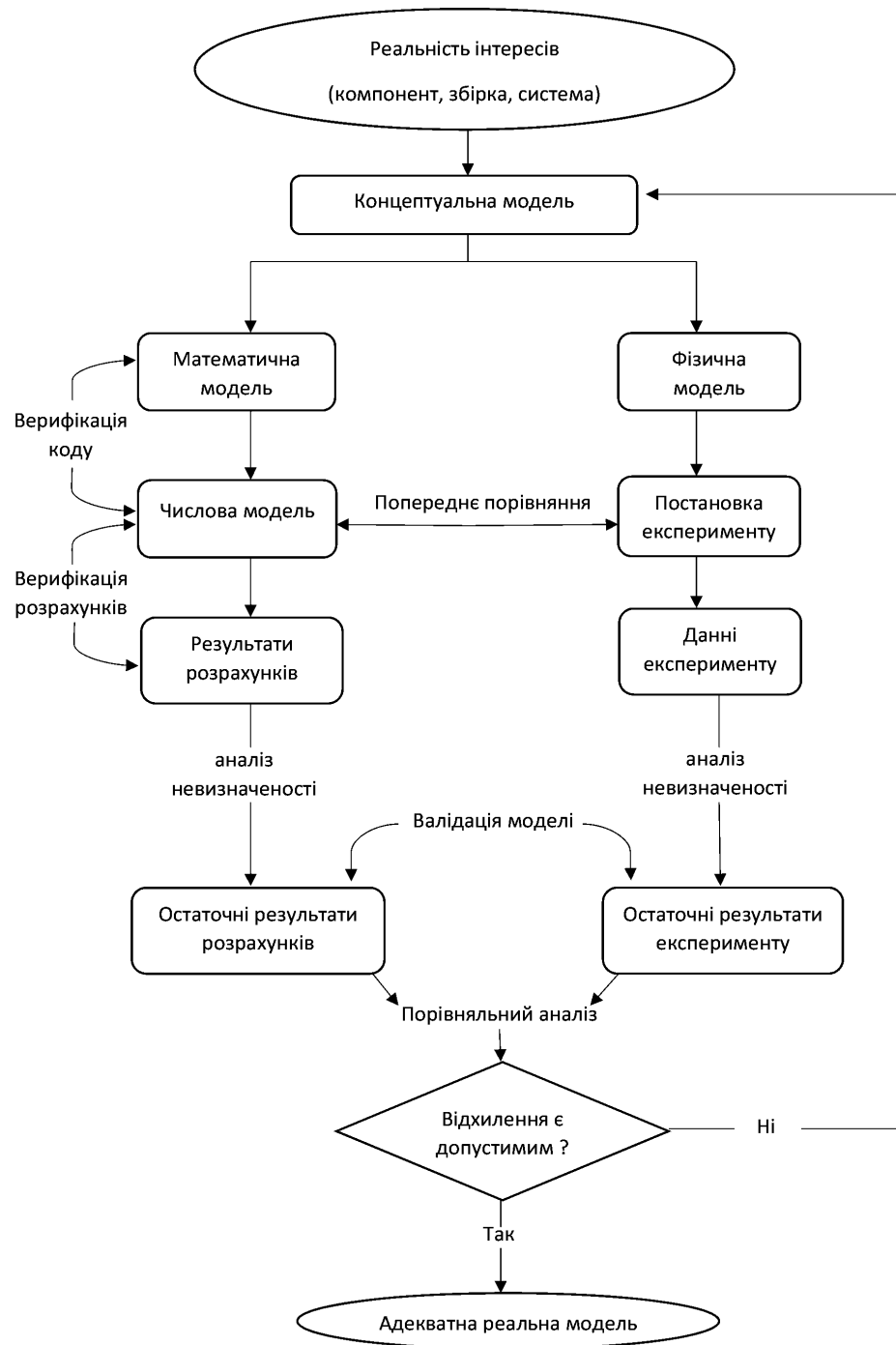


Рисунок 2.25 – Процеси верифікації та валідації [64]

Верифікація - процес встановлення відповідності між чисельною моделлю і математичною моделлю. Основні завдання даного процесу складаються з знаходження помилок програмування і удосконаленню математичних моделей для правильного вирішення рівнянь. Етапи в себе включають:

- Знаходження помилок в базовому коді програмування комп'ютера;
- Ітераційна збіжність;
- Збіжність розрахункової сітки;
- Аналіз часової збіжності для перехідних процесів;
- Порівняння результату з надійним рішенням.

Вказані п'ять етапів можна узагальнити у два розділи: верифікація програмного коду та верифікація розрахунків. Перший розділ проводиться для підтвердження коректної роботи математичної моделі та алгоритмів числового рішення систем рівнянь. Відповідальність за цей процес несе розробник програмного продукту, який повинен використовувати сучасні методи та системи управління якістю, а також проводити якісне тестування кожного релізу програмного коду. Другий розділ проводиться для підтвердження коректності виконання розрахунків з необхідним рівнем точності для відповідної математичної моделі. Відповідальність за цей процес несе користувач програмного продукту, який повинен встановити достатньо якісні параметри (кількість клітинок, локальне зменшення сітки, адаптація сітки, крок по часу та інше) для досягнення алгоритмічної точності.

В даній роботі процес верифікації виконується за рахунок зміни кількості клітинок, локального зменшення сітки, ступеню та місця адаптації сітки. Початкову сітку задають за допомогою розділу в дереві препроцесору вздовж напрямів осей x , y , z (рисунок 2.26). В нашому випадку сітку робимо більш густою в місцях перетину корпусу з рідиною.

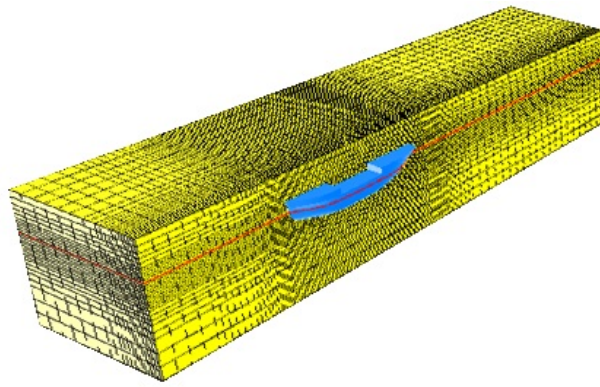


Рисунок 2.26 – Розрахункова сітка

Адаптація – це розбиття або злиття клітинок розрахункової сітки до зазначеного рівня в об'ємі або на поверхні (рисунок 2.27) [65]. Розбиття до n -го рівня передбачає поділ навпіл клітинок початкової сітки в кожному напрямку n разів. Злиття до n -го рівня передбачає об'єднання частин клітинок, раніше розбитих до рівня m (де $m > n$), до рівня n .

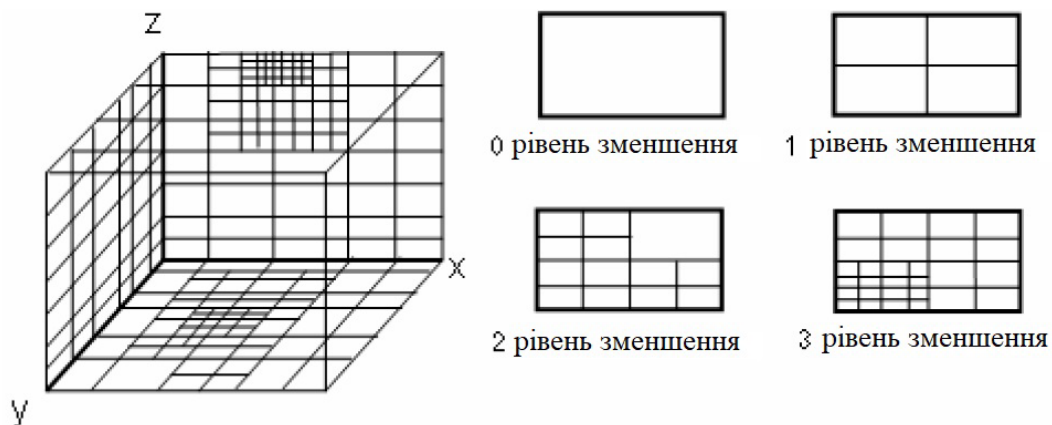


Рисунок 2.27 – Адаптація сітки [65]

Для підвищення точності задається рівень адаптації по поверхні корпусу судна (рисунок 2.28). В цьому випадку, усі клітки поблизу поверхні корпусу будуть зменшені до відповідного рівня.

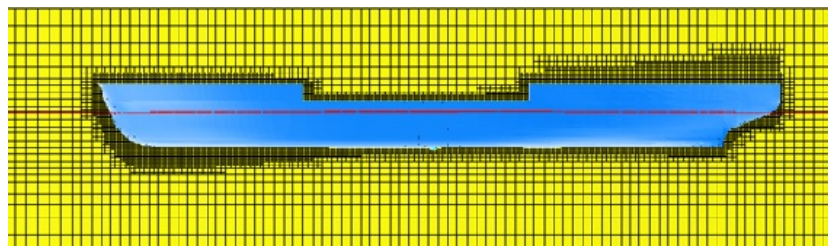


Рисунок 2.28 – Розрахункова сітка з урахуванням адаптації

Після виконання роботи з розрахунковою сіткою виконується перший розрахунок. Далі отриману сітку ще раз зменшують за допомогою зменшення сітки або підвищують ступінь адаптації сітки і виконується другий розрахунок. Отримані результати, які залежать від кількості ітерацій для різної густини загальної та локальної сітки порівнюються між собою. Ітерація це - організація обробки даних, при якій дії повторюються багато разів, не наводячи при цьому до викликів самих себе. Якщо крива вирівнюється або коливання стали не значні та циклічні, у випадку дослідження вільної поверхні, можна зробити висновок, що отримана сітка є правильною і подальше зменшення розрахункової сітки перестане впливати на результат. Також слід відмітити якщо первину сітку одразу зробити дуже дрібною із високою ступеню адаптації, такий розрахунок займатиме багато часу або в гіршому випадку може призвести до аварійного припинення розрахунку.

При виконанні розрахунку судна з місцевими особливостями поверхні виконується локальне подрібнення сітки в районі їх розташування, як це зображено на рисунку 2.29. Якщо цього не робити тоді програма не зможе прорахувати процеси які відбуваються поблизу та в їх середині.



Рисунок 2.29 – Локальне подрібнення сітки

Валідація - процес визначення ступеня відповідності розрахункової моделі реальному фізичному об'єкту.

З схеми взаємодії процесів верифікації та валідації можна зробити висновок, що не один з етапів першого не дає змогу визначити, наскільки обрана модель адекватна об'єкту дослідження. Оцінка відповідності чисельної моделі реальному об'єкту відноситься до завдань валідації, яка дозволяє визначити, наскільки фізичні явища і

закони, включені дослідником в розрахункову модель, відповідають постановці вхідного завдання і достатні для отримання необхідних результатів.

Даний процес можна добре спостерігати на простому прикладі дослідження опору гладкої пластини в програмному комплексі Flow Vision. На графіку залежності коефіцієнта опору гладкої пластини від числа Рейнольдса (рисунок 2.30) порівнюються результати отримані для гладкої пластини з різними параметрами боксу та результатами отримані за формулою Прандтля – Шлихтинга [66].

$$C_d = \frac{2R}{\rho v^2 S}, \quad (2.13)$$

де ρ – густина води, v – швидкість обтікання пластини, S – площа змоченої поверхні пластини, R – опір гладкої пластини.

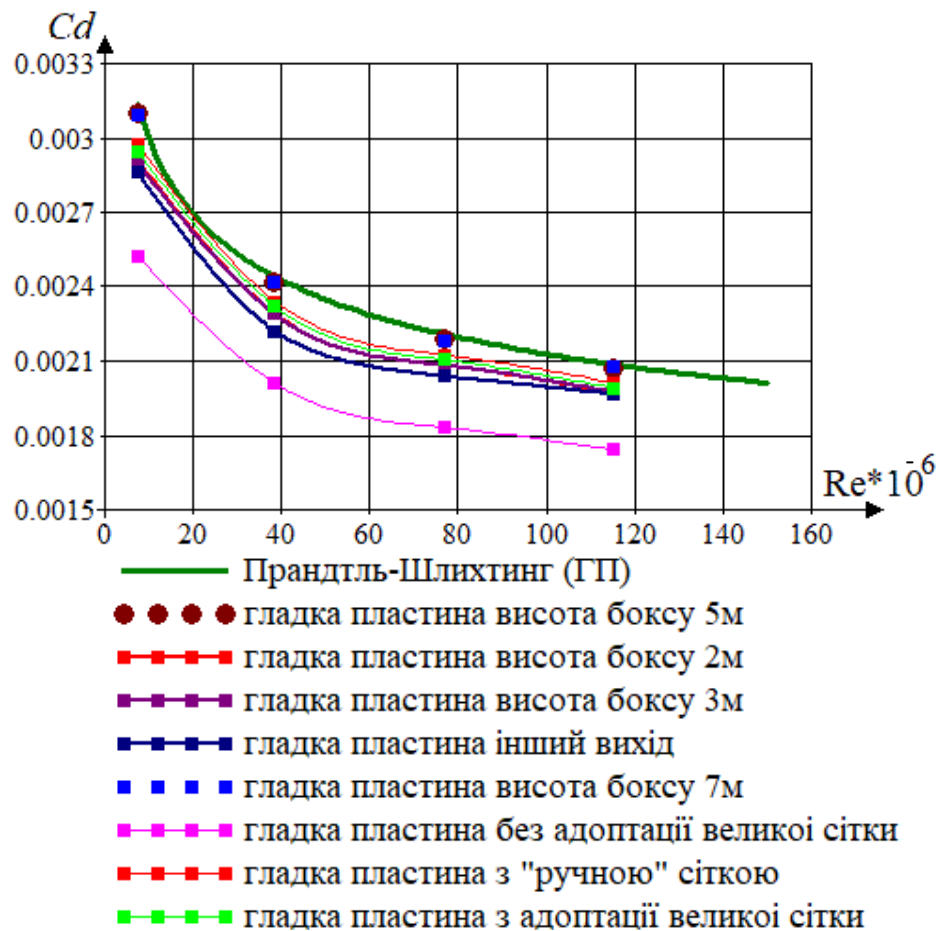


Рисунок 2.30 – Вплив параметрів боксу на результати розрахунків гладкої пластини

Аналізуючи приведений графік можна зробити висновок, що при правильному виборі параметрів боксу, щільності сітки та граничних умов розрахунки повністю співпадають з отриманими за формулою для гладкої пластини з висотою боксу 5 та 7 метрів.

Моделювання обтікання гладкого шару та шару для гольфу також виконувались в програмному комплексі Flow Vision, а отримані результати порівнювались з великою кількістю експериментів різних компаній [67, 68] з відповідними параметрами швидкості, розмірів об'єктів дослідження, тощо.

Процес валідції програмного продукту Flow Vision при моделюванні обтікання корпусу судна виконувався в різних варіантах. Так на прикладі моделі танкеру (рисунок 2.31), який досліджувався в оптовому басейні Одеського Національного Морського Університету, яке пов'язане з виконанням держбюджетної науково-дослідницької роботи (номер державної реєстрації №0117U000347, номер теми 2085). Параметри моделі наведені в таблиці 2.1.

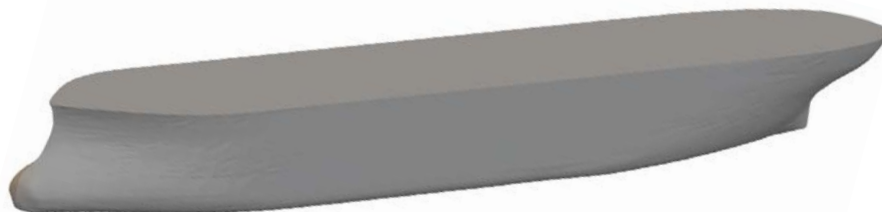


Рисунок 2.31 – Модель танкеру ОНМУ

Таблиця 2.1

Параметри моделі танкеру ОНМУ

Довжина	$L=2,64\text{м}$
Ширина	$B=0,33\text{м}$
Осадка	$d=0,086\text{м}$
Водотоннажність	$V=0,0689\text{м}^3$
Змочена поверхня	$\Omega= 1,259\text{м}^2$

Було порівняно три варіанти розрахунку даної моделі: експеримент ОНМУ, отримані результати з програмного продукту Hullspeed та отримані результати з програмного продукту Flow Vision , усі вони приведені в таблиці 2.2.

З таблиці видно, що результати експеримент ОНМУ та Flow Vision дуже близькі за значеннями, це в свою чергу показує високу ступень відповідності розрахункової моделі до реального фізичного об'єкта.

Таблиця 2.2

Результати розрахунків моделі

U , м/с	ОНМУ, Н	Hullspeed, Н	FlowVision, Н
0,547	0,981	1,27	1,001
0,665	1,472	1,89	1,491
0,763	1,962	2,48	1,983
0,839	2,453	3,01	2,43
0,9	2,943	3,4	2,949
0,945	3,434	3,82	3,43
0,983	3,924	4,29	3,95
1,021	4,415	4,54	4,44

У випадку коли досліджується натурне судно використовуються дані з ходових іспитів. Якщо такі дані відсутні, то так як програмний продукт Hullspeed також показав непогані результати при порівнянні з моделлю, можна виконувати порівняння з результатами його розрахунків.

Для процесу валідації програмних продуктів Flow Vision та Flow Simulation при моделюванні обтікання корпусу підводного човна, було виконано експеримент із буксирування моделі підводного човна. Для цього було підготовано модель сигаро

образної форми, яка по характеристикам відповідала підводному човну типу «Ліра». Модель має об'єм 8,38 літра, загальна площа $0,36\text{м}^2$, вага 8,38 кг. Співвідношення L/D становить 13, що знаходиться в межах звичайних L/D великих військово-морських підводних човнів. Деталі даного експерименту приведені в розділі 2.6.

Висновки по розділу 2. Узагальнюючи матеріали розділу, варто виділити наступні результати:

1. Виконано опис математичної моделі, порядок та основні принципи побудови розрахункових проектів в CFD комплексі Flow Vision. Для отримання надійних результатів, для кожного окремого дослідження, необхідно визначити параметри моделювання, такі як кількість клітинок розрахункової сітки, крок за часом, ступінь адаптації та інші.

2. Наведено опис математичної моделі, порядок та основні принципи побудови розрахункових проектів в CFD комплексі Flow Simulation. Так як в довіднику програмного продукту Solid Works немає інструкції щодо створення та роботи з вільною поверхнею, методом спроб та помилок було розроблено технологію моделювання обтікання тіла з вільною поверхнею.

3. Доведено, що вибір параметрів для верифікації та валідації розрахунків необхідно виконувати ретельно аналізуючи усі вимоги та обмеження. Вплив вибору параметрів розглянуто при верифікації та валідації на прикладі плоскої пластини, шару та модельних експериментів різних типів суден.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що у процесі дослідження було виявлено, що при користуванні CFD пакетами критичної уваги потребують процедура налаштування програм до конкретних задач, зокрема вибір моделей для турбулентних потоків, адаптація розрахункових сіток до локальних масштабів обраних об'єктів, ітераційної збіжності в розрахунках. У випадку неправильному встановленні вище вказаних параметрів, результати розрахунку не будуть відповідати реальному світу.

Результати досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:

Боднарчук Ю. С., (2019), Особливості вибору параметрів для верифікації та валідації розрахунків опору методами обчислювальної гідродинаміки / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// X міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 41-44. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків та проведення верифікації та валідації розрахунків)*

Боднарчук Ю. С., (2019), Особливості вибору параметрів для верифікації та валідації розрахунків при використанні методів обчислювальної гідродинаміки/ Ю. С. Боднарчук// IV International Scientific and Practical Conference – Osaka, No.4, pp.-254 - 262. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків канонічних тіл та співставлення отриманих розрахунків)*

РОЗДІЛ 3

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИЇМОК НА ОПІР ПІД ЧАС РУХУ КАНОНІЧНИХ ТІЛ

3.1 Верифікація програмного комплексу Flow Vision на прикладі задачі сфери з лунками

Добре відомо, що залежність коефіцієнта лобового опору сфери від числа Рейнольдса ділиться на 3 області: підкритична, критична і закритична. У підкритичній області коефіцієнт опору показує постійну величину близько 0,45. У критичній області коефіцієнт лобового опору раптово зменшується і досягає мінімального значення. У закритичній області коефіцієнт лобового опору поступово зменшується, а потім раптово збільшується. Критична область є перехідною від ламінарної течії до турбулентності потоку, що значно впливає як на опір, так і на підйомну силу. Крім того, відомо, що розмір критичної області залежить від структури поверхні, тобто від шорсткості і поглиблень.

Розглянемо геометрію сфери з лунками (рис. 3.1).

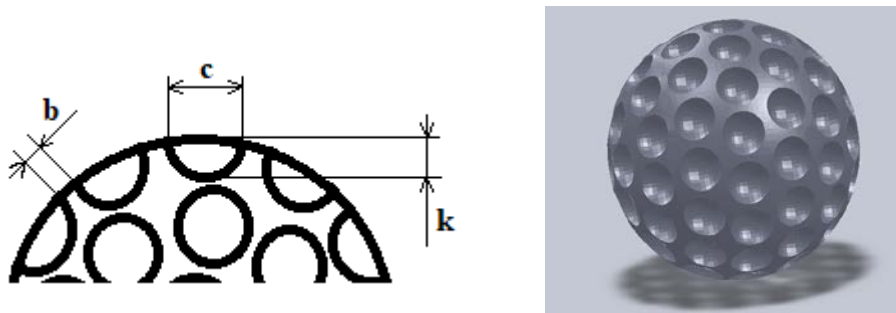


Рисунок 3.1 – Геометрія поверхні сфери з лунками

Де $D = 1,0$ м – діаметр сфери, $b_j = 0,01$ м – відстань між лунками; $c = 0,1$ м – ширинь лунки; $k_j = 0,05$ м – глибина лунки; $k_j/D = 0,05$.

Для дослідження ефекту на прикладі сфери з лунками використовуємо програмний комплекс Flow Vision v.2.3. Обираємо математичну модель нестисливої рідини.

Наступним кроком ми задаємо граничні умови на кордонах розрахункової області. Граничні умови задаються для кожної з розрахункових змінних. Щоб полегшити вибір і виключити постановку несумісних граничних умов, вони об'єднані у типи границь. Кожен з типів відповідає певному фізичному процесу, який відбувається на кордоні. Використовуємо наступні типи границь (рис. 3.2).

Гранична умова "Стінка" означає стінка, логарифмічний закон:

$$V_n = 0, \tau_w = \mu \left. \frac{\partial U}{\partial y} \right|_{y=0}, \quad (3.1)$$

де дотичній швидкості на стінці дорівнює:

$$V_w = V - n(nV). \quad (3.2)$$

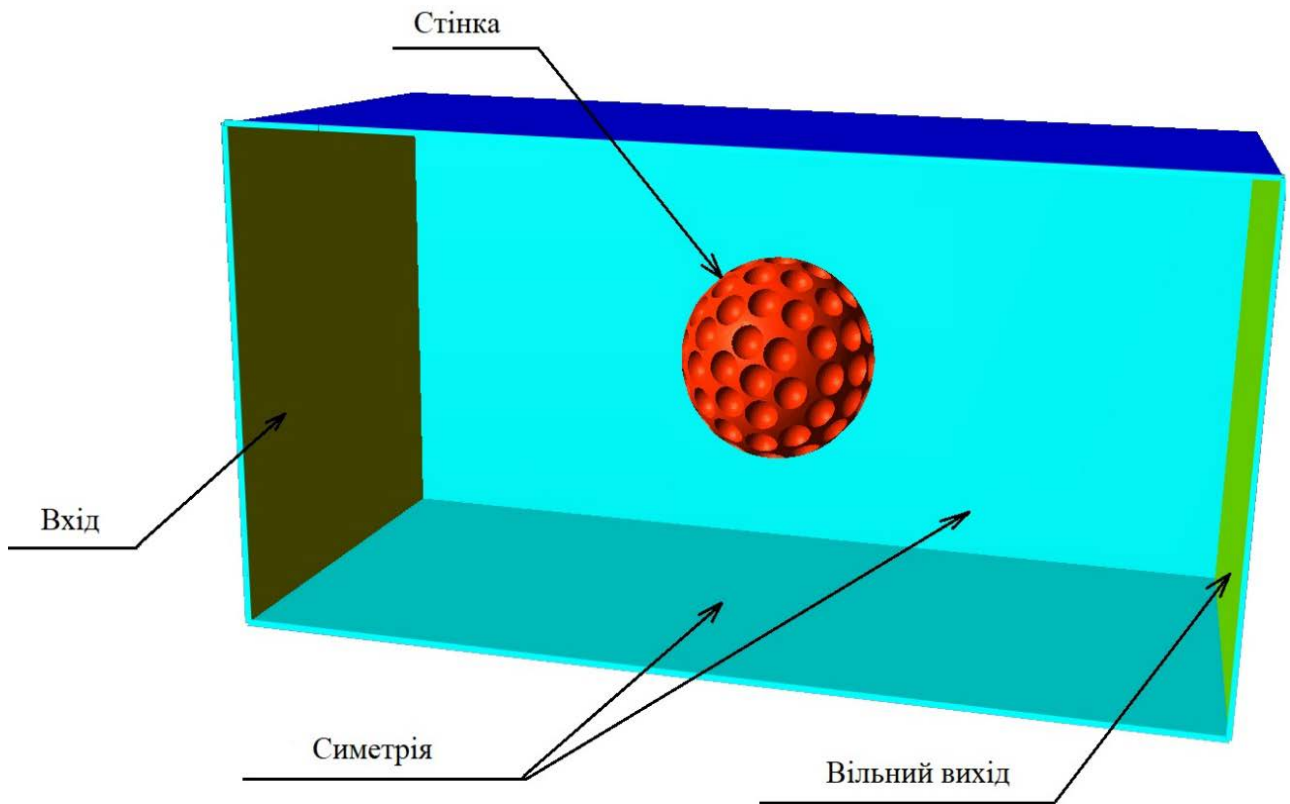


Рисунок 3.2 – Граничні умови сфери з лунками

При використанні даної умови на поверхнях, які мають не нульову кривизну вздовж напрямку руху, слід звернути увагу на те, що при встановленні постійного вектору швидкості, дотична швидкість на самій поверхні буде залежати від кривизни поверхні (рис. 3.3 – 3.4).

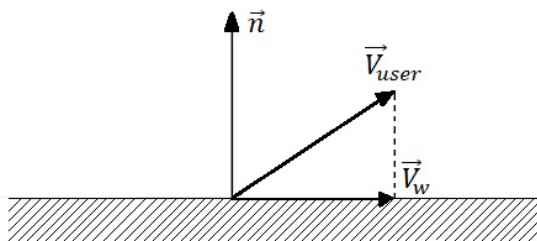


Рисунок 3.3 – Схема швидкостей на поверхнях з нульовою кривизною [65]

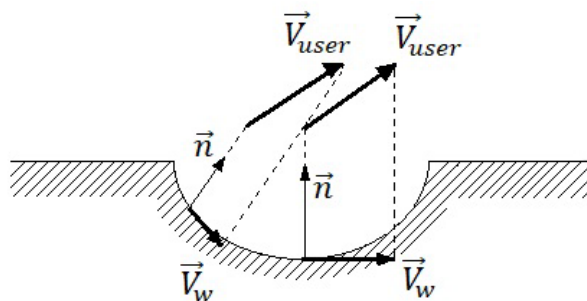


Рисунок 3.4 – Схема швидкостей на поверхнях з не нульовою кривизною [65]

Гранична умова "Вхід" означає нормальну швидкість:

$$V_n = V_w, V_t = 0. \quad (3.3)$$

Гранична умова "Симетрія" означає стінка з прослизанням:

$$V_n = 0, \frac{dV_t}{dn} = 0. \quad (3.4)$$

Гранична умова "Вихід" означає, що надлишковий тиск нульовий:

$$P=0. \quad (3.5)$$

Початкову сітку задають за допомогою розділу "Начальная сетка" в дереві процесору. У вікні, що з'явилося, є три підрозділи, в яких сітка задається вздовж напрямів вісей x , y , z (рис. 3.5).

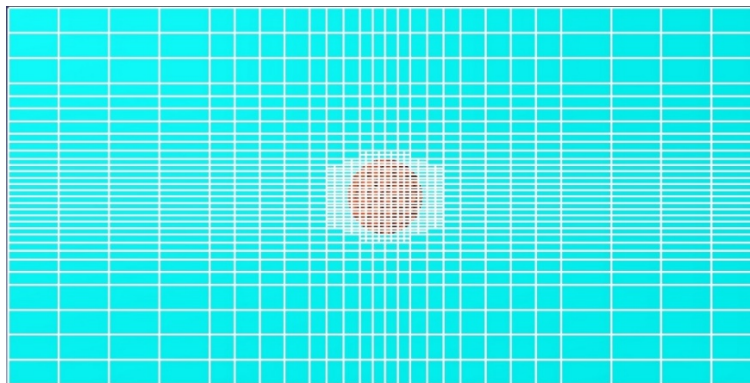


Рисунок 3.5 – Розрахункова сітка

Переходимо до отриманих результатів після розрахунків (рис. 3.6).

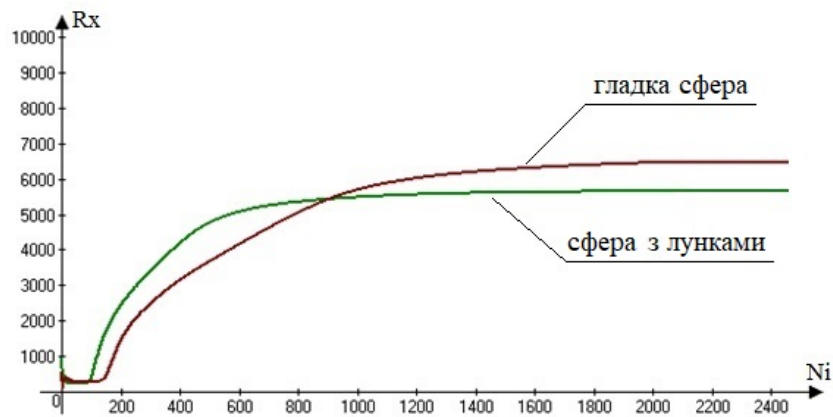


Рисунок 3.6 – Порівняння кривих опору гладкої сфери і сфери з лунками при швидкості 15м/с (R_k – опір кулі, N_i – номер ітерації)

Порівняння гладкої сфери та сфери з лунками показало, що при встановленні лунок на поверхні сфери критичне значення лобового опору зменшується, а закритичне значення збільшується. Тобто, критична область сфери з лунками зміщується до малих чисел Рейнольда в порівнянні з гладкою сферою.

$$C_D = \frac{2R_x}{\rho v^2 S_c}; S_c = \pi D^2. \quad (3.6)$$

При відношенні $k/D = 0,05$, де k_j – глибина лунки, а D – діаметр сфери, $C_D = 0,35$ та $Re = 1,8 \cdot 10^4$ (рис. 3.7), що дозволяє знизити опір сфери з лунками в порівнянні з гладкою сферою.

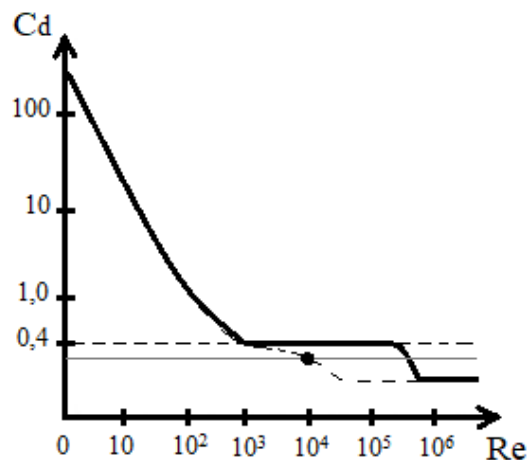


Рисунок 3.7 – Залежність коефіцієнта опору кулі від числа Рейнольда:
— – коефіцієнта опору гладкої сфери; - - - – коефіцієнта опору сфери з лунками

У сфери з лунками точка відриву зміщується вниз за течією (рис. 3.8).

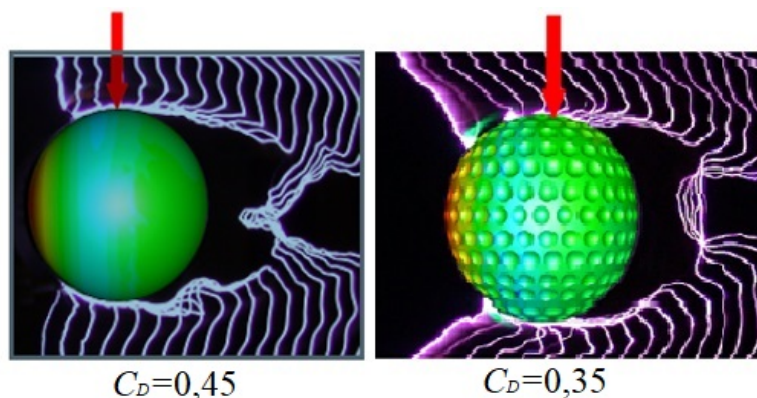


Рисунок 3.8 – Візуалізація обтікання сфери іскровим методом [15]

В порівнянні з гладкою сферою у сфери з лунками зменшується гідродинамічний слід та знижується критичне число Рейнольдса. Отримані результати наштовхнули на думку, що даний ефект та його модифікації можна використовувати на різних об'єктах. В нашій роботі ми досліджували ефективність виїмок на двох типах циліндричних тіл, на погано обтічному тілі, трьох типах корпусів суден та на двох типах підводних човнів.

3.2 Дослідження впливу місця розташування та форми виїмок на опір циліндричного тіла

Маючи метою дослідження впливу спеціальних поглиблень-виїмок на змоченій поверхні суден на опір їхньому руху, розглянемо в першому наближенні процес обтікання циліндричного тіла, зображеного на рис. 3.9.

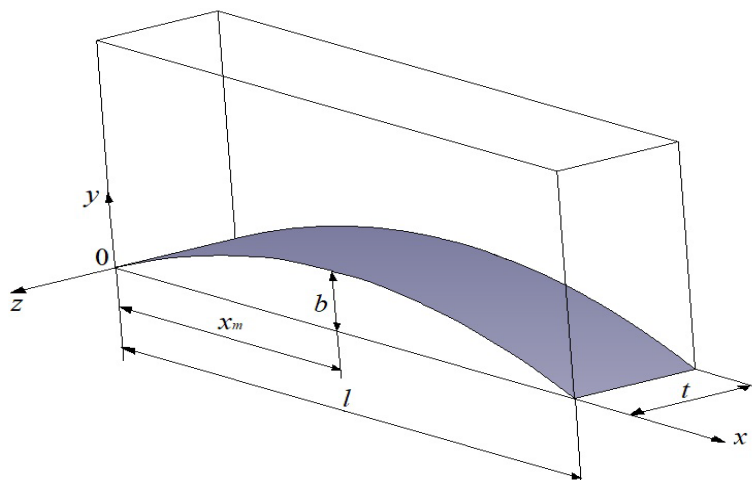


Рисунок 3.9 – Параметри циліндричного тіла

Геометричні характеристики цього тіла наступні: l – довжина; b – максимальний вигин кривої, що імітує ватерлінію; t – подовження тіла вздовж z напрямку; x_m – абсциса максимального вигину; S – площа частини циліндричного тіла, що досліджується. Цифрові значення варіантів характеристик, що досліджувалися, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Числові значення характеристик циліндричного тіла

№ варіанту	l , м	b , м	t , м	x_m , м	S , м ²
1	10.0	1.0	2.0	5.0	20,5
2	10.0	1.0	2.0	2.0	20,79
3	10.0	1.0	2.0	3.0	20,61
4	10.0	1.0	2.0	6.0	20,53
5	10.0	1.0	2.0	7.0	20,77

На змоченій поверхні об'єкта молекулярні сили між стінкою та водою призводять до того, що частинки води практично не мають швидкості відносно поверхні стінки, що зазвичай називають умовою ковзання. На невеликій відстані від поверхні швидкість не дорівнює нулю. І чимдалі від поверхні швидкість стає ближчою до швидкості набігаючого потоку або швидкості руху об'єкту у воді [69]. Області потоку, які відбуваються на поверхні циліндричного тіла, зображені на рисунку 3.10.

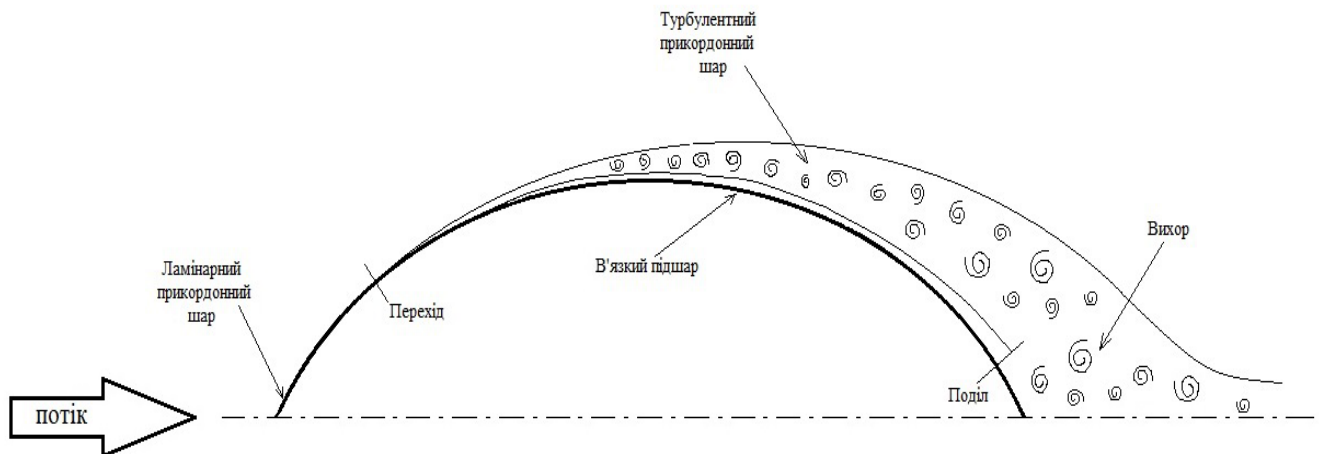


Рисунок 3.10 – Утворення шарів на поверхні умовної ватерлінії

На початку обтікання потік є плавним і без перешкод, тобто ламінарним. На деякій відстані в потоці виникають збурення, створюються невеликі вихри і відбувається перехід в більш хаотичний, турбулентний прикордонний шар, який формується з суміші великих та малих вихорів. Всередині турбулентного прикордонного шару, поряд з поверхнею об'єкта, є дуже тонкий підшар, що має товщину 0,1 мм і являється ламінарним, навіть коли в ньому можуть виникати короточасні сплески коливань [70-71].

Циліндричне тіло досліджувалось у CFD пакеті Flow Vision, змінюючи при цьому вигин циліндра до потоку та від нього. За результатами досліджень впливу вигину відносно потоку на опір, який зображений на рисунку 3.11, вигин від потоку є більш ефективним для зменшення опору, тобто варіант 5.

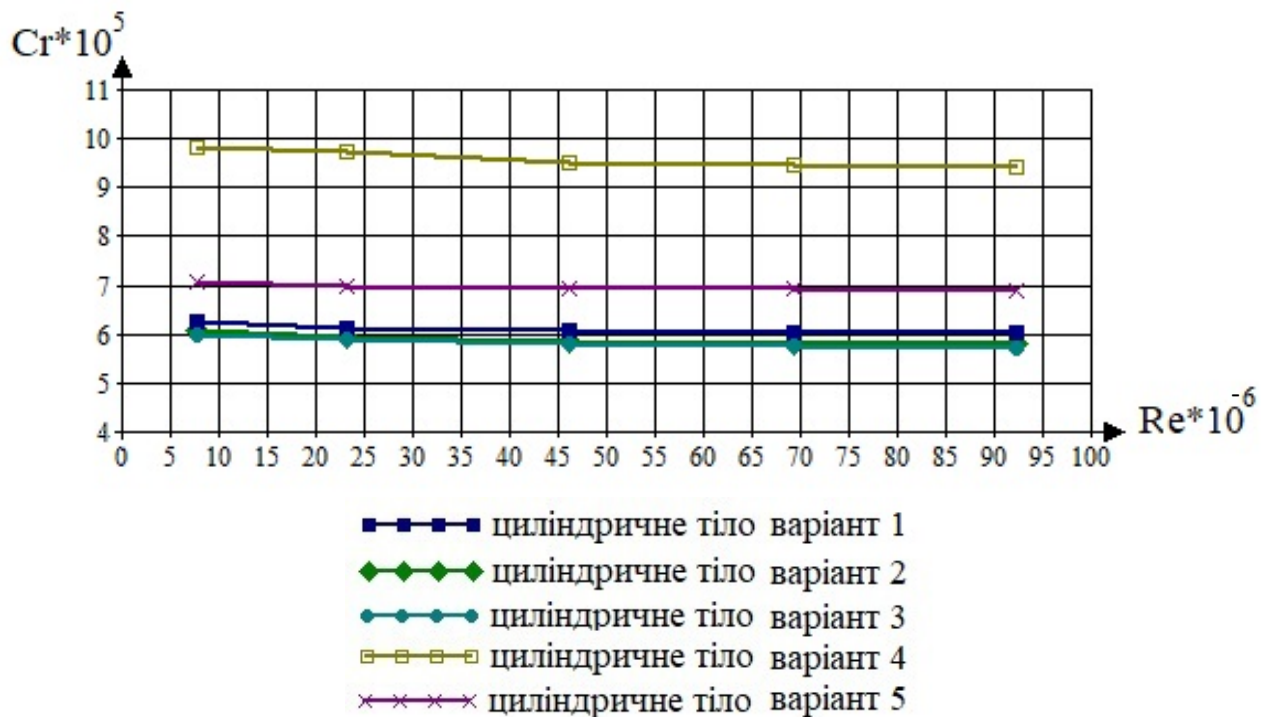


Рисунок 3.11 – Обтікання циліндричного тіла з різними типами вигину відносно потоку

Також було отримано характерні картини розподілення тиску при обтіканні циліндричного тіла з різними абсцисами максимального вигину, які зображені на рис. 3.12.

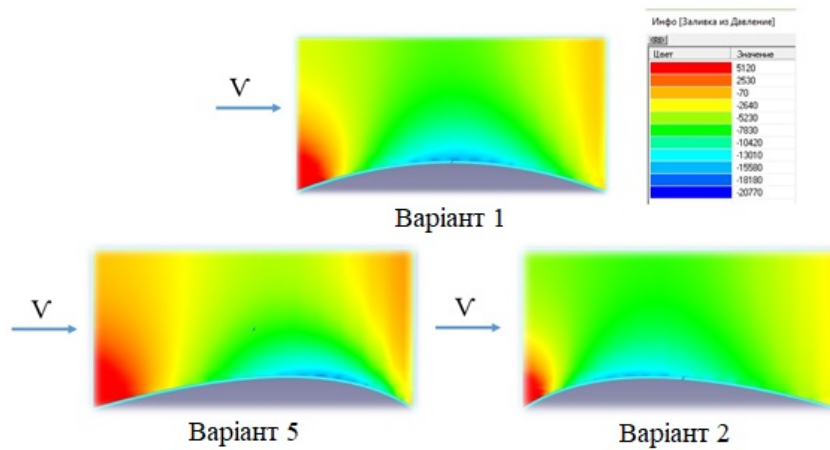


Рисунок 3.12 – Візуалізація поля тиску при обтіканні циліндричного тіла

Далі пропонується встановити одну поперечну виїмку на поверхні циліндричного тіла, як один з варіантів імітації ефекту м'яча для гольфу. Одна виїмка відносно площі поверхні м'яча для гольфу досить мала, приблизно 0,1%, тому спочатку розміри виїмки були прийняті як 5% від площі досліджуваної частини циліндричного тіла і були встановлені на варіанті 1 (рис. 3.13).

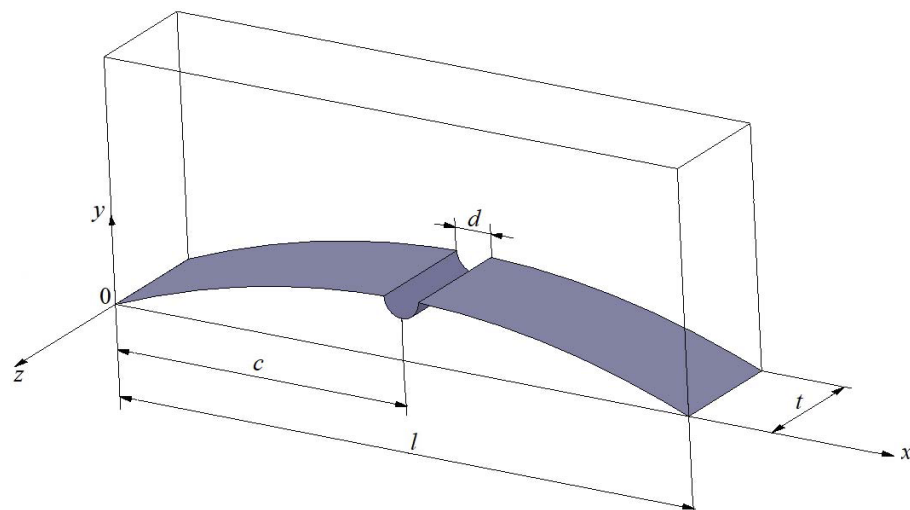


Рисунок 3.13 – Параметри циліндричного тіла з встановленою однією поперечною виїмкою, варіанті 1

За результатами розрахунків було побудовано графік (рис. 3.14), на якому зображена ефективність виїмки з різним місцем розташуванням по відношенню до гладкого циліндричного тіла.

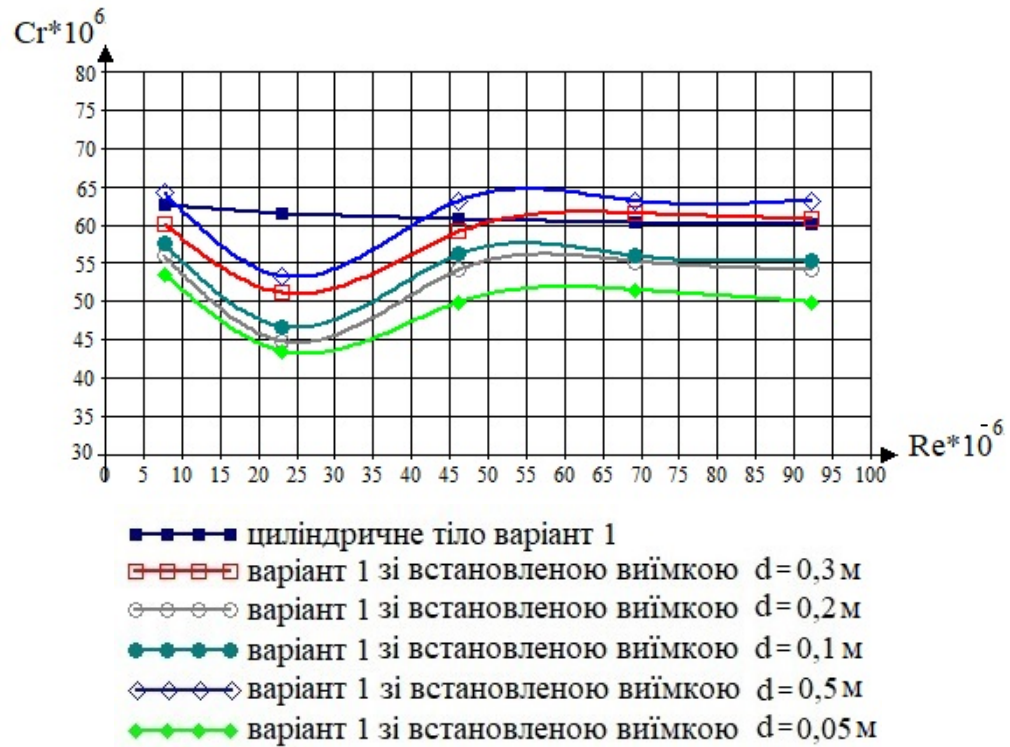


Рисунок 3.16 – Обтікання циліндричного тіла з різними розмірами виймок

Слід відзначити, що максимальний ефект, при встановленні поперечної виймки на поверхні циліндричного тіла запропонованої форми, спостерігається в діапазоні від $20 \cdot 10^6$ до $30 \cdot 10^6$ чисел Ренольдса, при підвищенні чисел ефект також присутній.

Далі змінюємо геометрію виймок для більшої ефективності. Розглядалося чотири варіанти геометрії, які зображені на рисунку 3.17.

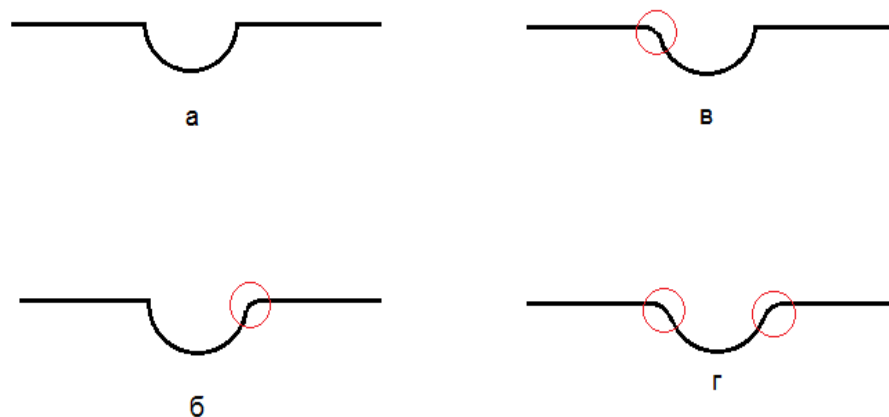


Рисунок 3.17 – Геометрія виймок

Для пояснення явищ, які відбуваються всередині виймок, розглянемо картину поля швидкостей та поля тиску (рис. 3.18–3.19).

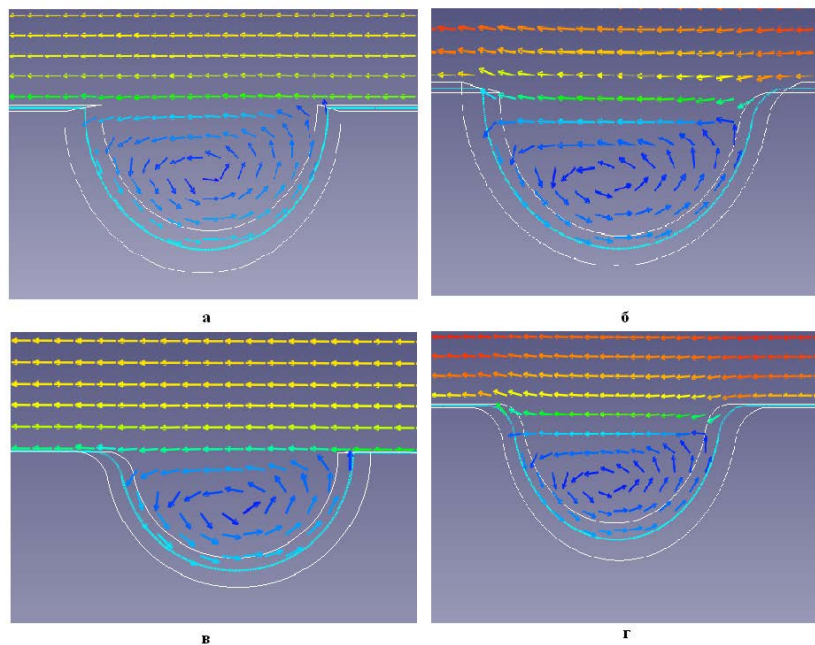


Рисунок 3.18 – Поле швидкостей в виїмках різноманітної конфігурації

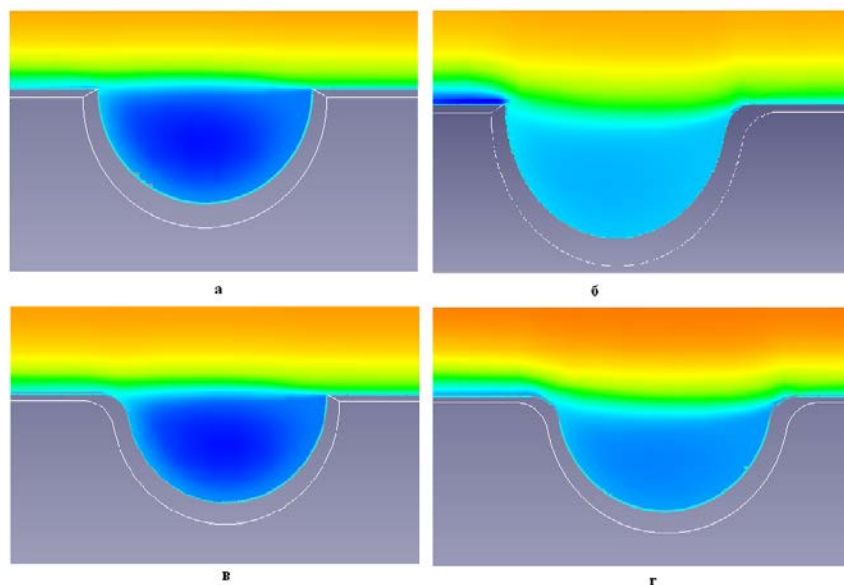


Рисунок 3.19 – Поле тиску в виїмках різноманітної конфігурації

Аналізуючи приведенні вище зображення, можна сказати, що усередині усіх виїмок тиск низький за рахунок вихрового руху. В виїмці з закругленою передньою кромкою (на зображенні б) яскраво видно, що тиск за нею різко знижується.

Так як закруглення передньої кромки показало позитивний результат, то був проведений ряд дослідів, спрямований на знаходження оптимального радіусу закруглення. Результати цих дослідів приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Результати дослідження закруглення

Назва, №	Радіус закруглення, м	Відсоток, на який знизився опір по відношенню до R_0 , %
R_1	0,1	0,22
R_2	0,5	5,85
R_3	1	8,89
R_4	1,5	11,99
R_5	5	17,37
R_6	10	20,5
R_7	15	22,75
R_8	20	24,16

Для пояснення досить високого зниження опору за рахунок закруглення передньої кромки виїмки розглянемо конструкцію виїмки та характер руху векторів швидкості та поле тиску (рисунки 3.20 – 3.21).

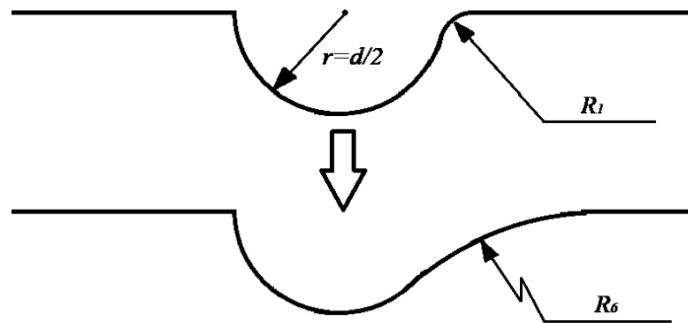


Рисунок 3.20 – Конструкція виїмки

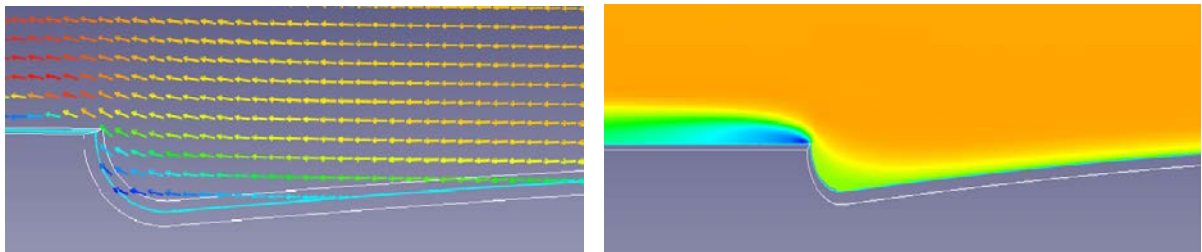


Рисунок 3.21 – Поле швидкостей та тиску в виїмці із закругленням

На зображеннях можна спостерігати різке падіння тиску всередині виїмки та після неї. За рахунок такої форми виїмки відбувається різке збільшення швидкості і

немає зростання тиску, тому така форма найбільш сильно впливає на закон розподілення тиску вздовж тіла.

За результатами дослідження ефекту від встановлення виїмок на поверхні циліндричного тіла зроблено висновки, що коефіцієнт опору залежить від місця розташування виїмок, їх форми та розміру, а найкращій результат можна отримати при $Re = 22 \cdot 10^6$.

Аналіз отриманих результатів. Процес пошуку оптимальних розмірів, кількості, форми і місця розташування виїмок на поверхні циліндричного тіла можна рекомендувати встановлення однієї поперечної виїмки специфічної форми (глибиною $k=0,03\text{м}$) на поверхні, з вказаними параметрами, для зниження опору на 20%

3.3 Дослідження впливу виїмок, розташованих на поверхні кругового циліндру

Для дослідження впливу на зниження опору підводного човна від встановлених виїмок, використовуємо той же принцип від простого до складного, тобто від циліндричного тіла до корпусу судна. У випадку корпусу судна ми досліджували опір циліндричного тіла. У випадку підводного човна, так як основою корпусу є об'єкт обертання, ми досліджуємо повністю круговий циліндр. Круговий циліндр малого подовження, насамперед, характеризується відносним подовженням $\lambda = A/B$, де A – довжина циліндра, а B – ширина. До циліндрів малого подовження будемо відносити циліндри з подовженням $\lambda < 10$. Обтікання циліндрів з обома закріпленими кінцями дозволяє уникнути перетікання потоків на кінцях циліндра, тобто в місці кріплення циліндра затікання по торцю не відбувається.

На рисунку 3.22 приведена геометрія кругового циліндра з виїмками за основними розмірами, що дорівнюють $A = 102$ м і $B = 14,8$ м, а d – діаметр виїмки та C – відстань до виїмки, є предметами дослідження.

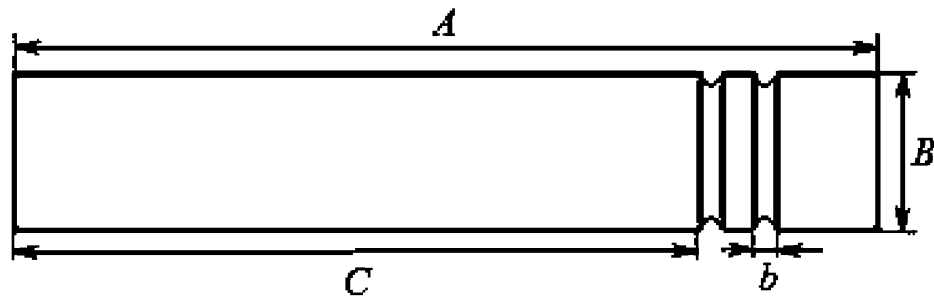


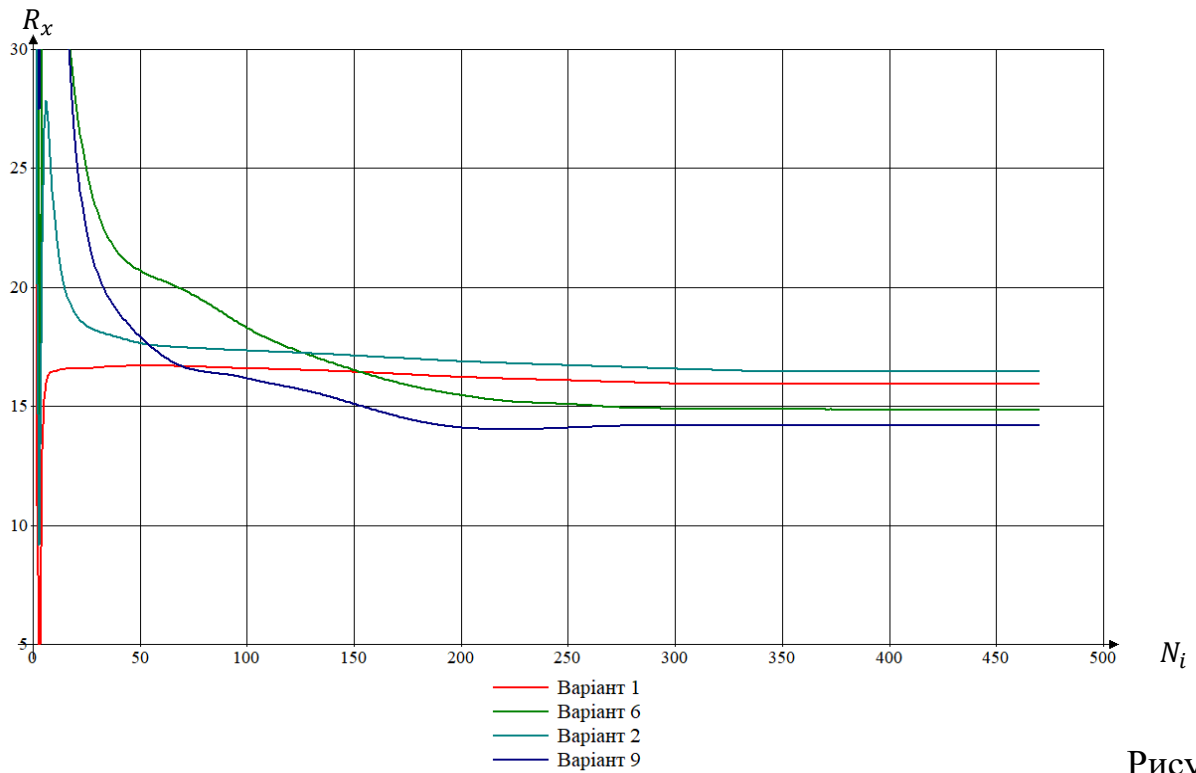
Рисунок 3.22 – Геометрія поверхні кругового циліндра з виїмками

При підборі оптимального місця розташування, кількості і форми виїмок у програмному комплексі FlowVision було досліджено 9 моделей циліндрів. Найкращі результати були отримані, коли було встановлено дві виїмки діаметром 0,5 м, результати приведені в таблиці 3.3 і на рис. 3.23.

Таблиця 3.3

Верифікація параметрів виїмок на поверхні кругового циліндра

Номер Варіанта	Варіанти виїмок на поверхні циліндра	Опір $R_x \cdot 10^5$, [кН]	Зниження опору, %
1	Гладкий циліндр	15,93	0
2	Циліндр з виїмкою 0,01В	16,48	+3,45
3	Циліндр з виїмкою 0,014В	15,51	2,64
4	Циліндр з виїмкою 0,022В з закругленням однієї кромки	15,21	4,52
5	Циліндр з виїмкою 0,022В з закругленням двох кромek	15,15	4,89
6	Циліндр з виїмкою 0,021В	14,84	6,84
7	Циліндр з виїмкою 0,02В	14,72	7,59
8	Циліндр з 2-ма виїмками по 0,021В	14,64	8,09
9	Циліндр з 2-ма виїмками по 0,02В	14,21	10,4



Рисунок

3.23 – Порівняння кривих опору кругового циліндра і кругового циліндра з виїмками при швидкості 14 м/с (R_x – опір циліндра, N_i – номер ітерації)

Аналізуючи візуалізацію поля тиску (рис. 3.24) в виїмках на поверхні циліндра, видно, що всередині виїмок тиск знижений. Це дозволяє змінити картину розподілу тиску по поверхні кругового циліндра. Результати розрахунку показали, що при встановленні двох виїмок відбувається зниження опору циліндра приблизно на 14%.

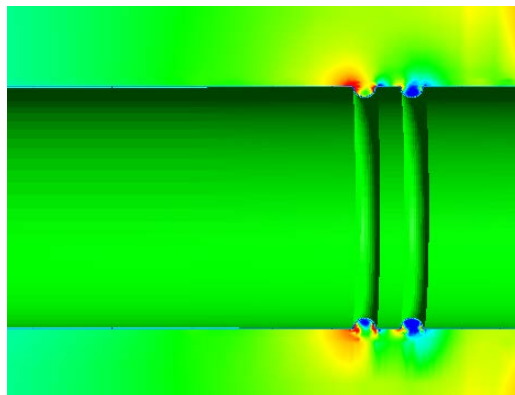


Рисунок 3.24 – Поле тиску в виїмках на поверхні циліндра при швидкості 14 м/с

Використання виїмок на відносно простих прикладах поверхонь циліндричного тіла та кругового циліндру показало досить непоганий результат, що дає змогу для

подальшого дослідження впливу виїмок на більш складних поверхнях корпусів суден та підводних човнів. Проте слід відмітити, що корпус судна має особливості конструкції та обводів, і тому отримані результати потребують корегування.

Аналіз отриманих результатів. Процес пошуку оптимальних розмірів, кількості і місця розташування виїмок на поверхнях кругового циліндра представляє собою перехідний етап, який показав добрий результат зниження опору циліндра приблизно на 14%.

Висновки по розділу 3. Узагальнюючи матеріали розділу, варто виділити наступні результати:

1. Підчас виконання верифікації програмного комплексу Flow Vision на прикладі задачі сфери з лунками було підтверджено зниження опору від їх встановлення. В порівнянні з гладкою сферою у сфери з лунками зменшується гідродинамічний слід та знижується критичне число Рейнольдса. Отримані результати наштовхнули на думку, що даний ефект та його модифікації можна використовувати на інших об'єктах.

2. Було змодельоване обтікання циліндричного тіла, де замість лунок встановлена виїмка на його поверхні поперечної орієнтації. Було проведено ретельну верифікацію впливу розмірів, форми, кількості і місця розташування виїмок для досягнення максимального зниження опору. Отриманий результат дає змогу для подальшого дослідження впливу виїмок на більш складних поверхнях корпусів суден. Проте слід відмітити, що корпус судна має особливості конструкції та обводів, і тому параметри форми, кількість і розташування виїмок потребують корегування.

3. Процес пошуку оптимальних розмірів, кількості і місця розташування виїмок на поверхнях кругового циліндра представляє собою перехідний етап для розрахунку підводного човна. Результати розрахунку показали, що при встановленні двох виїмок відбувається зниження опору циліндра приблизно на 14%.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що була доведена можливість зниження гідродинамічного опору канонічних тіл шляхом розміщення на

їх поверхні спеціальних поглиблень – виїмок, яка отримана за допомогою сучасних методів обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу впливу розмірів, форми, місця розташування, кількості і швидкості руху та дозволяє знизити опір цих тіл при певних умовах (для розглянутих форм канонічних тіл найвища ефективність при числах Рейнольдса $2 \cdot 10^7 \div 3 \cdot 10^7$) від 5 до 20%;

Результати досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:

Боднарчук Ю. С., (2013), Влияние лунок на аэрогидродинамическое сопротивление пластины, шара и кругового цилиндра / Ю. С. Боднарчук// Вісник НУК імені адмірала Макарова, №4, pp. 7-13.

Боднарчук Ю. С., (2019), Розрахунок опору різної форми ватерлінії та ватерлінії зі встановленими виїмками на її поверхні методами обчислюваної гідродинаміки / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VII (24), pp-49-52. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

Боднарчук Ю. С., (2013), Эффект лунки та її вплив на опір плоскої пластини / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// V науково-практична конференція всеукраїнського конкурсу наукових робіт – Миколаїв, С. 7-9. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

РОЗДІЛ 4

ЧИСЕЛЬНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИЇМОК НА ОПІР РУХУ СУДЕН

4.1 Дослідження впливу встановлених виїмок на змоченій поверхні корпусів судна

Відомо, що опір руху судна залежить від багатьох факторів, які, в свою чергу, впливають на величину сил опору, такі як головні розміри судна, форми обводів, стан поверхні зовнішньої обшивки, швидкості, режиму руху, параметри посадки і умови експлуатації. Розрахунковим режимом для надводних водотонажних суден є режим плавання (рисунок 4.1) [72], коли діючі на судно сили тяжіння практично повністю врівноважуються архімедовою силою підтримки, тобто:

$$F_{rv} = \frac{v}{\sqrt{g^3 \sqrt{V}}} < 1 \quad (4.1)$$

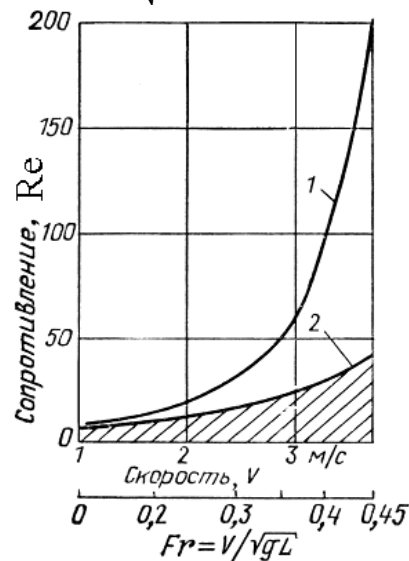


Рисунок 4.1 – Типові криві опору води руху водотонажного судна в залежності від швидкості: 1 – повний опір; 2 – опір тертя

При обтіканні корпусу судна існують дві критичні точки (рисунок 4.2) [69], які впливають на зміни характеру обтікання корпусу. У першій точці (А) відбуваються

зміни потоку з ламінарного в турбулентний, у другій точці (В) відбувається відрив прикордонного шару, за яким слідує завихрення потоку. У цих же точках і відбуваються зміни розподілу тиску на поверхні корпусу судна.

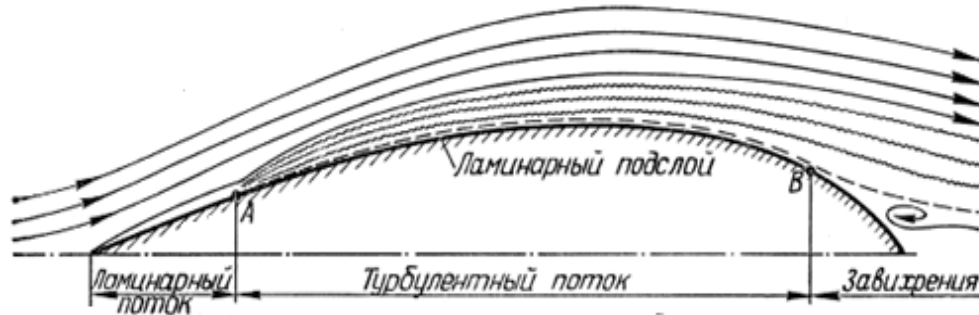


Рисунок 4.2 – Обтікання корпусу і зміни в прикордонному шарі [69]

Встановлення виїмок є одним із способів активного впливу на пограничний шар, що в свою чергу викликає перерозподіл тиску по корпусу судна. Для підтвердження цього ефекту була створена 3D модель суховантажного судна з гладкою поверхнею в CAD пакеті SolidWorks (Рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – 3D модель суховантажного судна

Наведений корпус суховантажного судна має наступні характеристики, які приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Характеристики суховантажного судна

Довжина судна найбільша	$L_{нб} = 93,28$ м
Довжина судна по ватерлінії	$L_{квл} = 91,64$ м
Ширина судна	$B = 12,7$ м
Висота борту судна	$H = 6,7$ м
Осадка судна	$T = 5$ м

Продовж. табл. 4.1

Коефіцієнт загальної повноти	$C_B = 0,703$
Коефіцієнт повноти ватерлінії	$C_W = 0,691$
Коефіцієнт повноти мідель-шпангоуту	$C_m = 0,983$

Розрахунок опору гладкого корпусу судна методом обчислювальної гідродинаміки в програмному комплексі FlowVision виконується наступним чином. В першу чергу, необхідно створити область розрахунку, яка представляє собою об'єм, в якому визначені рівні математичної моделі й границі об'єму, на яких визначені граничні умови. Для моделювання обтікання корпусу судна створюємо розрахункову область у вигляді паралелепіпеда. Розмір розрахункової області вибирається з міркувань мінімізації впливу зовнішніх граничних умов на картину обтікання корпусу. Якщо розглядається рух в необмеженій акваторії, то рекомендовані початкові розміри розрахункової області, які відносяться до характерних розмірів корпусу судна, вказані на рисунку 4.4.

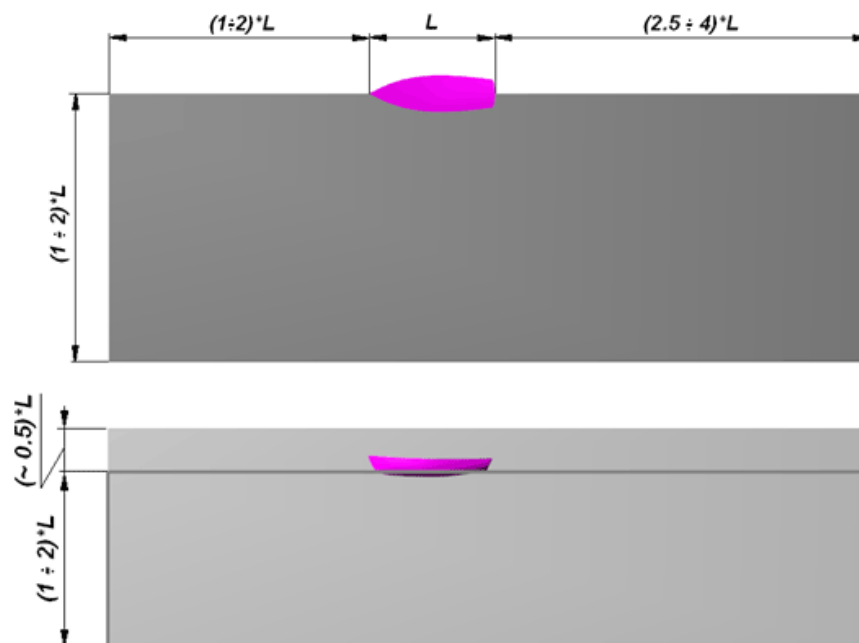


Рисунок 4.4 – Рекомендовані розміри розрахункової області [65]

Другим кроком виконуємо імпортування корпусу судна, яке відбувається за допомогою розділу "Фільтр" у дереві процесору (рис. 4.5). Так як завантажується

геометрія з файлу для подання його в якості поверхні твердого тіла, яке може рухатися в розрахунковій області, то автоматично створюється фільтр типу "Движущееся тело".

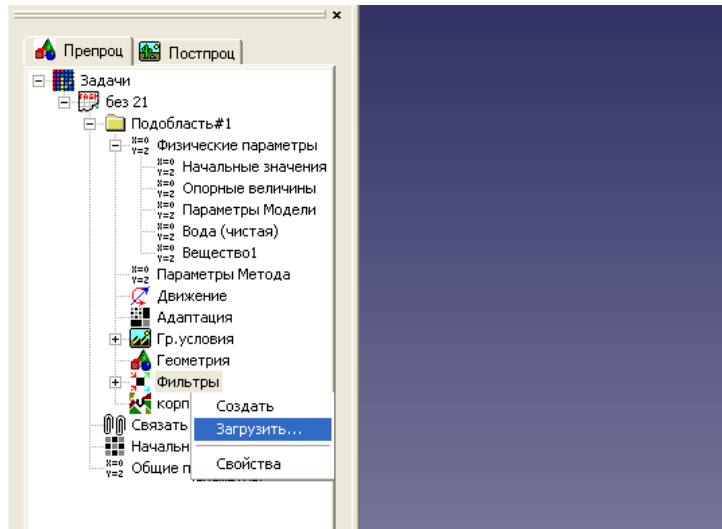


Рисунок 4.5 – Створення фільтру рухомого тіла

Даний тип фільтру містить в собі його властивості, виставлення яких представляє собою третій крок (рис. 4.6 – 4.8). На першій сторінці обираємо властивість в закладці "Обновление", де приведені параметри, які відповідають за частоту оновлення поточного положення тіла:

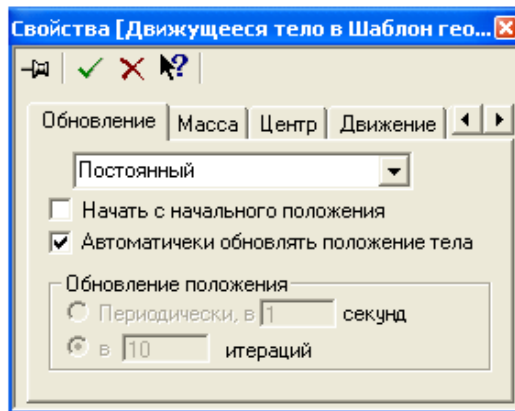


Рисунок 4.6 – Властивість "Обновление"

На другій закладці обирається властивість "Масса", де приведені параметри, що характеризують інерційні властивості рухомого тіла. Для даного судна маса була

обчислена в програмному комплексі Maxsurf, а моменти інерції були обчислені за допомогою наближених формул.

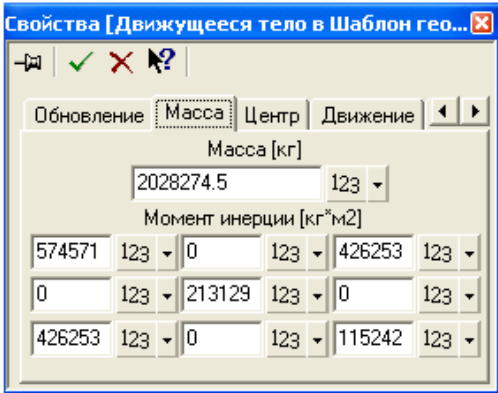


Рисунок 4.7 – Властивість "Маса"

На третій закладці знаходиться властивість "Центр", де приведені координати центрів інерції та обертання:

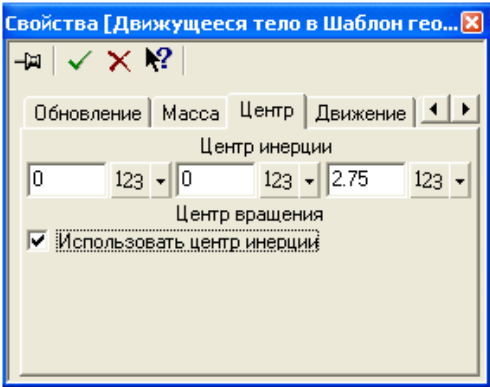


Рисунок 4.8 – Властивість "Центр"

На четвертій та п'ятій закладках приведені параметри руху та обертання тіла відповідно. В даній роботі задаємо свободу руху по вісі „Z” і свободу для обертання по вісі „Y” (рис. 4.9).

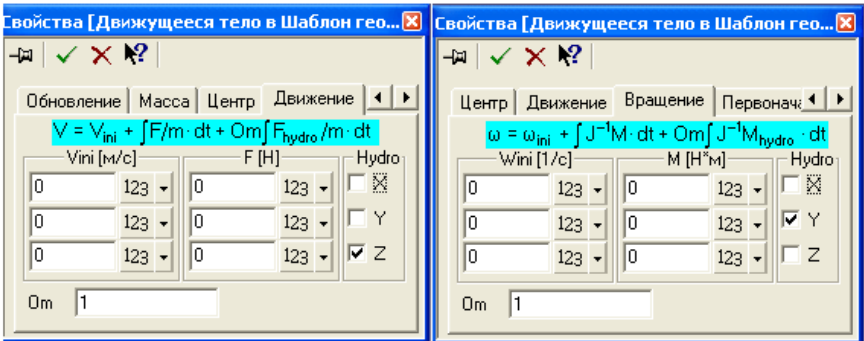


Рисунок 4.9 – Задавання ступенів свободи судна

На шостій закладці задається початкове положення тіла (рис. 4.10), а на сьомій приводиться поточне положення тіла в ході розрахунку:

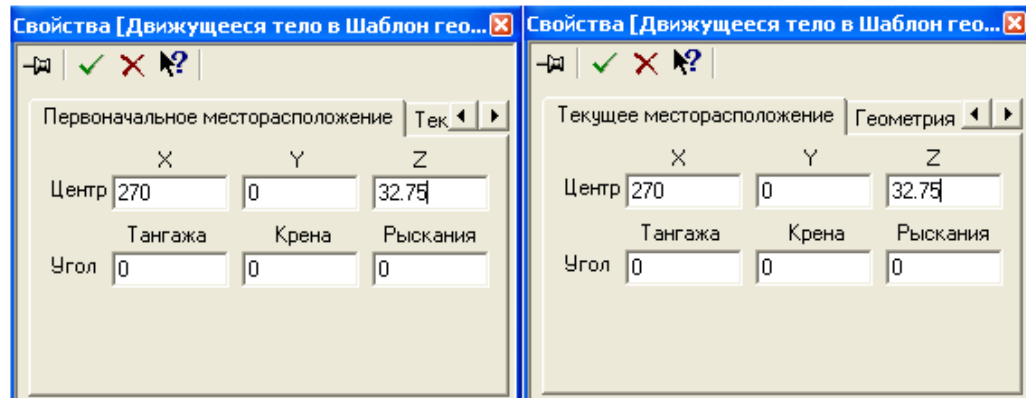


Рисунок 4.10 – Положення моделі

На останній, восьмій закладці приведені властивості геометрії даного тіла (рис. 4.11). У розділі "Граничные условия" приведений перелік граничних умов даної підобласті. Четвертим кроком вибираємо з переліку необхідну умову, вона буде встановлена на усіх фасетках даного тіла.

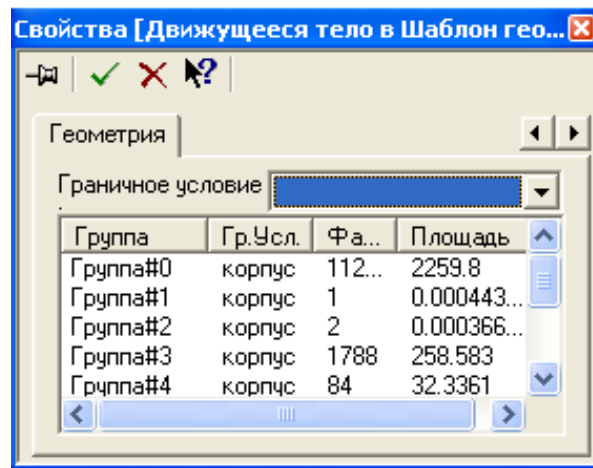


Рисунок 4.11 – Властивості геометрії

Створена підобласть повинна мати свій набір граничних умов (ГУ). При створенні нової ГУ можна задавати рівень адаптаційної сітки, який буде проводитися для даного типу ГУ. Для цього розрахунку використовуються чотири ГУ, такі як: корпус, вхід, вихід та симетрія. На ГУ "Корпус" обираємо тип границі "Стенка". На ГУ "Вхід" обираємо тип границі "Вход / выход" – нормальна швидкість. На ГУ "Вихід"

обираємо тип границі "Свободный выход" – нульовий тиск, нульовий потік. На ГУ "Симетрія" оби́раємо тип границі "Симметрия" – стінка з прослизанням (рисунок 4.12).

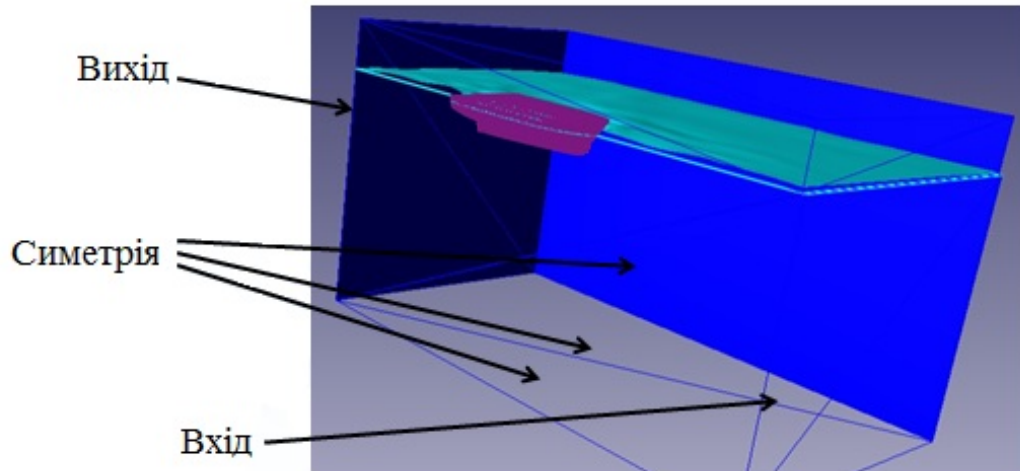


Рисунок 4.12 – Встановлення граничних умов

На п'ятому кроці задаємо початкову сітку. Початкова сітка задається вздовж напрямів вісей x , y , z (рисунок 4.13). В нашому випадку сітку робимо більш густою в місцях перетину корпусу з рідиною.

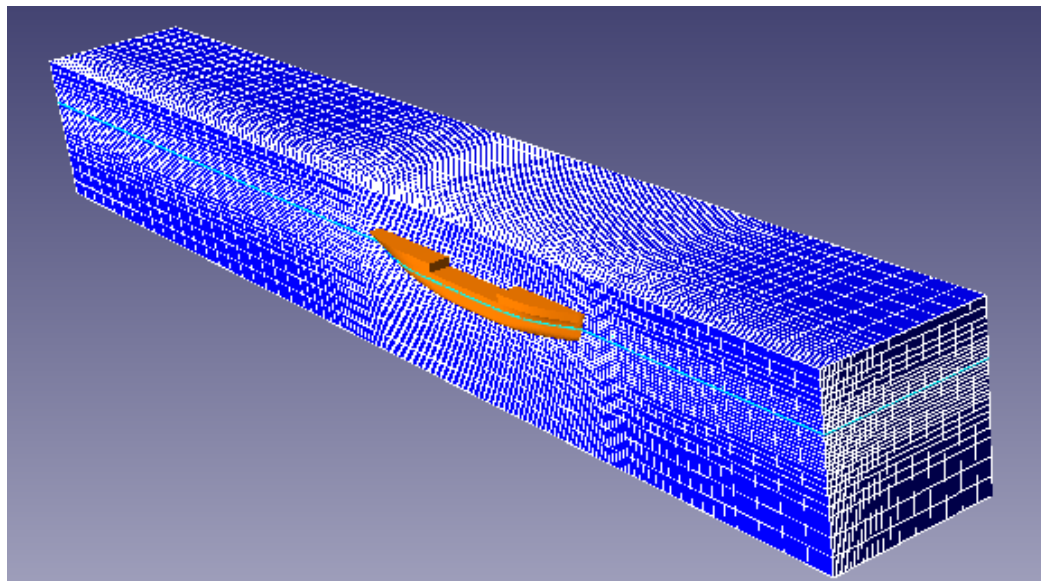


Рисунок 4.13 – Розрахункова сітка

Для підвищення точності задається рівень адаптації (рис. 4.14). В цьому випадку усі клітинки поблизу поверхні корпусу будуть зменшені до відповідного рівня.

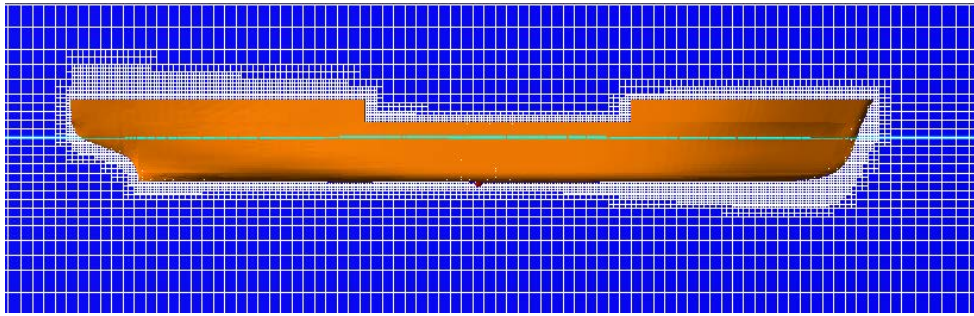


Рисунок 4.14 – Розрахункова сітка з урахуванням адаптації

Під час виконання розрахунку судна зі встановленою виїмкою виконується локальне зменшення сітки в місці встановлення виїмки (рис. 4.15). Якщо цього не зробити, то програма не зможе прорахувати процеси, які відбуваються поблизу та всередині виїмки.

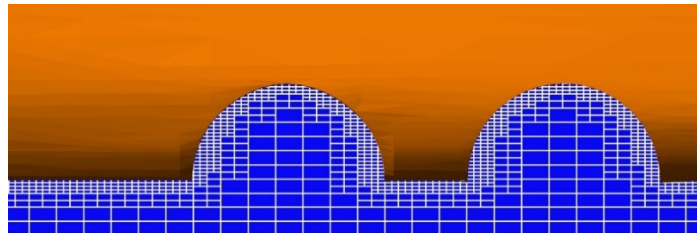


Рисунок 4.15 – Локальне зменшення сітки

Шостий крок: так як в даній роботі моделюється процес обтікання, то для його візуального уявлення необхідно створити візуалізацію вільної поверхні. Для цього необхідно створити шар ізоповерхні по всьому об'єму боксу за змінною "Относительный объём жидкости в ячейках" (рис. 4.16)

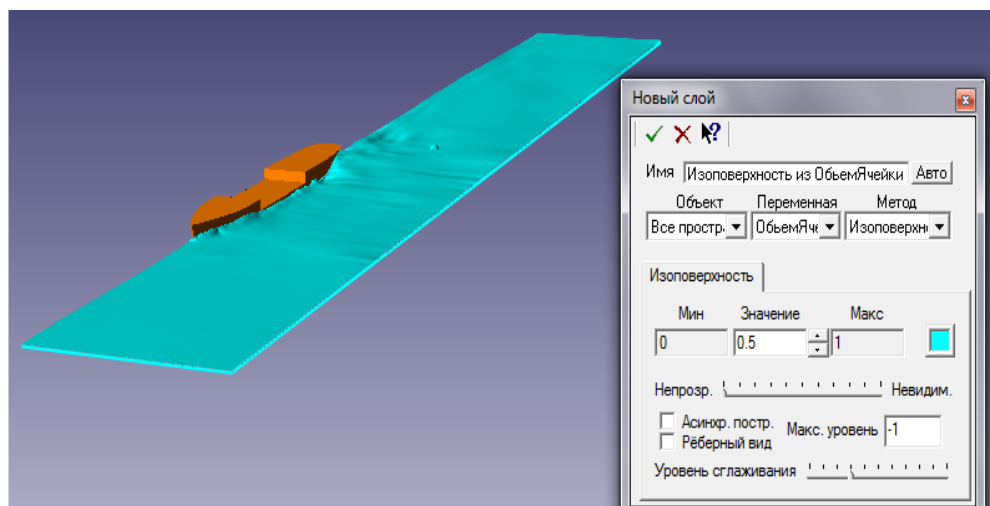


Рисунок 4.16 – Створення вільної поверхні

Сьомий крок: для візуалізації результатів необхідно мати інформацію про розподіл тиску і швидкості в просторі, який моделюється. Для цього впершочергове необхідно налаштувати положення площини і векторів нормалі (рис. 4.17):

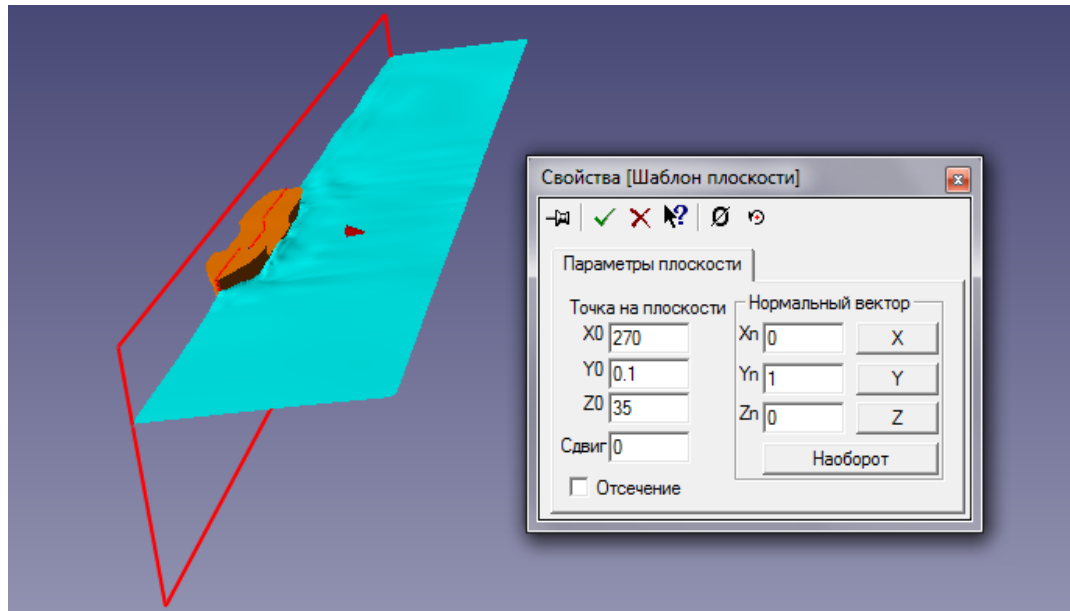


Рисунок 4.17 – Налаштування площини

На восьмому кроці створюються шари. Для цього вибирається об'єкт, з якого створюється шар, змінна, яка буде візуалізуватися, і метод візуалізації (рис. 4.18 – 4.19).

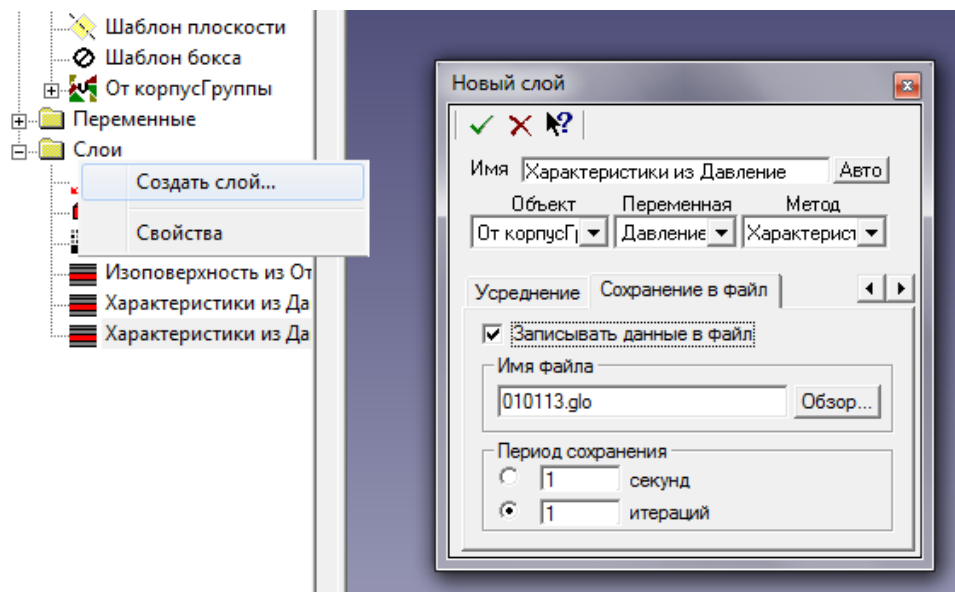


Рисунок 4.18 – Створення шару "Характеристики давления"

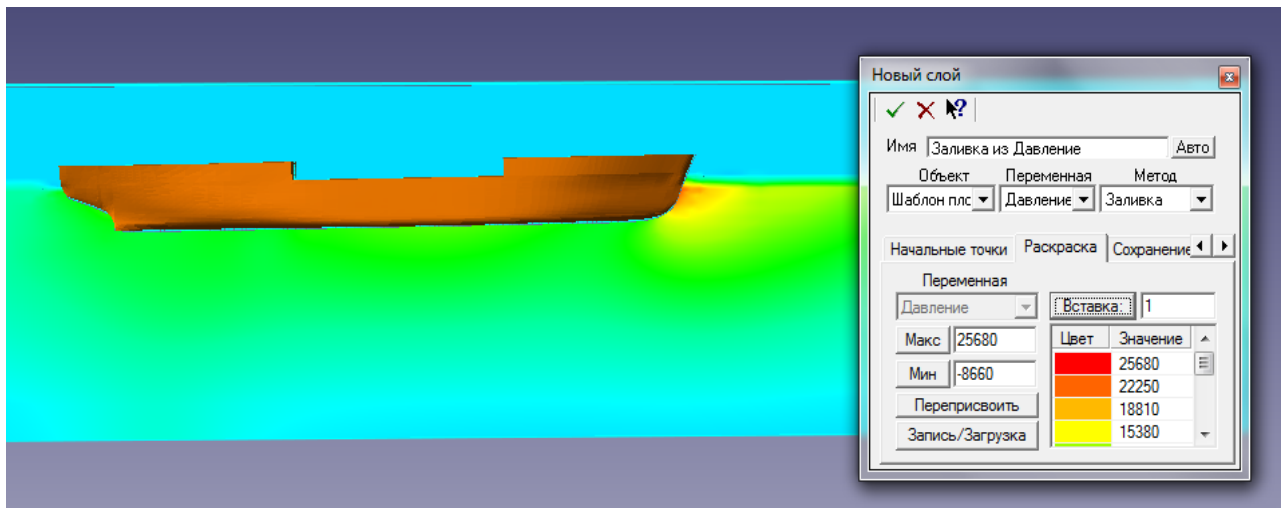


Рисунок 4.19 – Створення шару "Заливка давления"

Крім постановки задачі, необхідно ще переконатися, що кількість клітинок та крок за часом є достатніми для коректності отриманих результатів. В результаті досліджень виявилось, що кількість клітинок повинна бути не менше ніж 1 мільйон, а КФЛ 2.

Після виконання усіх вимог можна приступати до розрахунку. Результатом розрахунку буде обчислення буксиру вального опору судна в напрямку вісі ОХ, яке можна знайти в інформаційному вікні шару "Характеристики из давления". Для отримання додаткової візуальної інформації можна створити шар "Вектори швидкості".

За допомогою програмного комплексу FlowVision було досліджено первинний корпус судна. Після чого було розглянуто 3 варіанти корпусів з встановленими на їх днищевій поверхні виїмками: 1 - корпус з двома виїмками, 2 - корпус з виїмкою з заокругленням 20 м і 3 - корпус з виїмкою з заокругленням 100 м (рисунок 4.20 – 4.22).

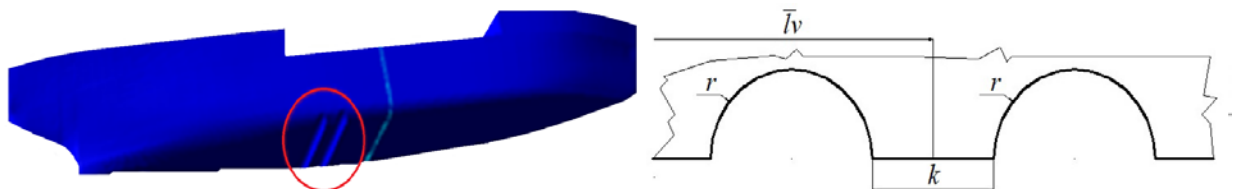


Рисунок 4.20 – Нова форма корпусу



Рисунок 4.21 – Корпус з виїмкою зі закругленням 20



Рисунок 4.22 – Корпус з виїмкою зі закругленням 100

Де $\bar{l}_v = l_v / L_{\text{нб}}$ – місце розташування виїмки від довжини судна, починаючи з кормового перпендикуляру; r – розмір виїмки, м; k – відстань між виїмками, м. Всі корпуси досліджувалися в однакових умовах і при однакових швидкостях 6 м/с.

За даними, отриманими з середовища Flow Vision, будуються графіки залежності між кількістю ітерацій і буксирувальним опором. Значення R_x береться як середнє значення між екстремумами, коли оточуючий потік рідини вже є сталим і далі це значення подвоюється в силу того, що при моделюванні обтікання досліджувалася лише половина корпусу судна. Отримані дані наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Опір судів в середовищі Flow Vision

Вид судна	Опір судна, кН	Зменшення опору у відсотках, %
Гладкий корпус	80,496	0,00
Корпус з двома виїмками	68,726	14,62
Корпус з виїмкою із закругленням 20	65,272	18,91
Корпус з виїмкою із закругленням 100	70,384	12,56

За результатами розрахунків отримали картини обтікання наведених корпусів (рисунок 4.23 – 4.25), з яких можна зробити висновок, що виїмки на поверхні корпусу

судна змінюють характер тиску на його поверхні. За рахунок виїмки відбувається перерозподіл тиску, тиск підвищується раніше, що дозволяє наблизити картину тиску до стану судна, що рухається в ідеальному середовищі.

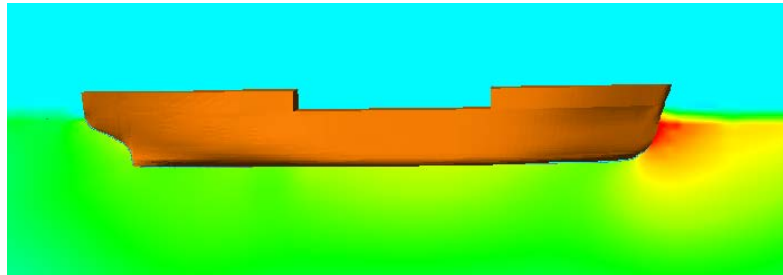


Рисунок 4.23 – Картина обтікання гладкого корпусу

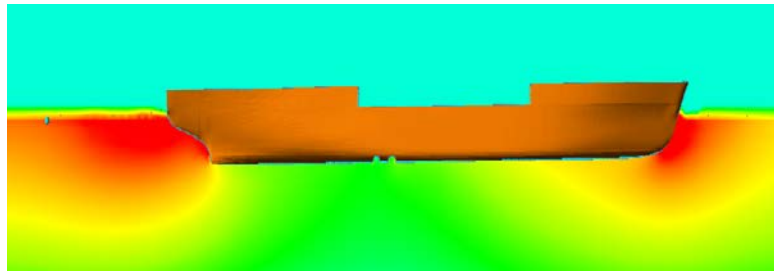


Рисунок 4.24 – Картина обтікання корпусу з двома виїмками

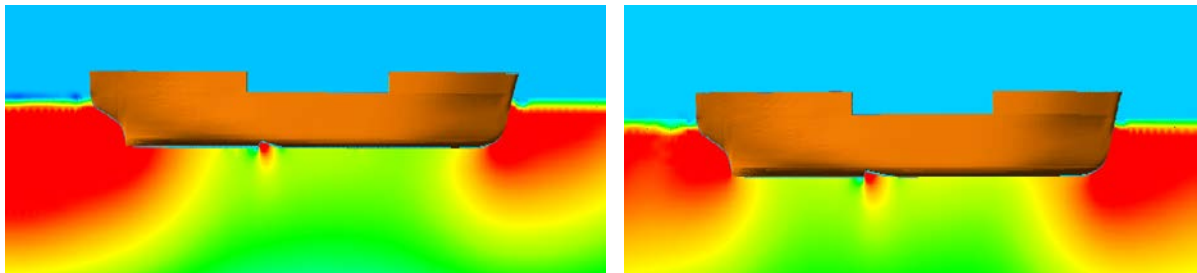


Рисунок 4.25 – Картина обтікання корпусу з виїмкою із закругленням 20 та з виїмкою із закругленням 100

Розглянемо картину швидкостей корпусів на рисунках 4.26 – 4.27.

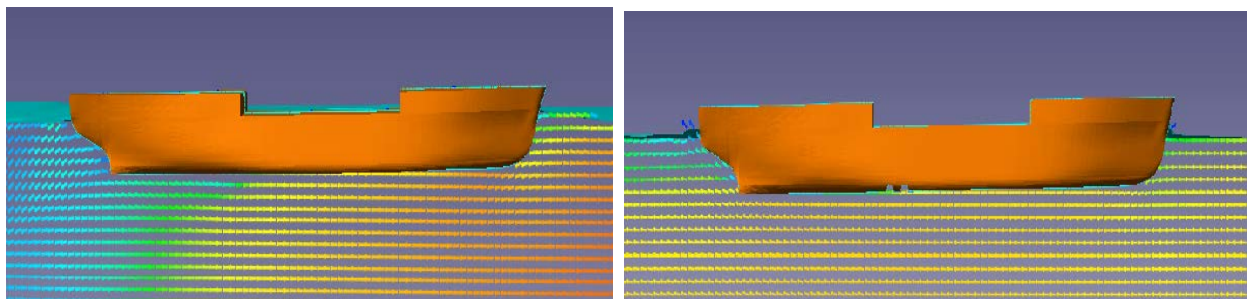


Рисунок 4.26 – Вектори швидкості уздовж гладкого корпусу та корпусу з двома виїмками

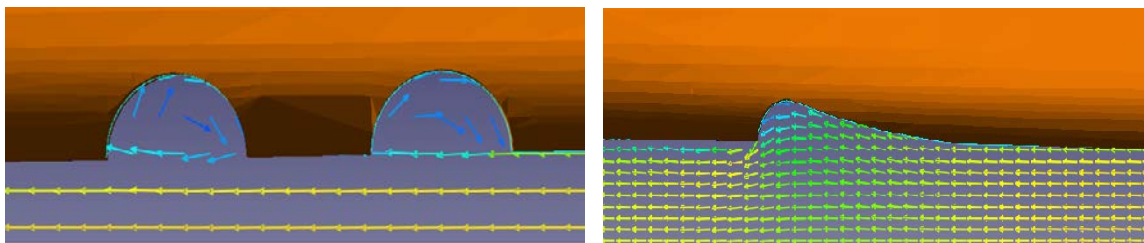


Рисунок 4.27 – Вектори швидкості уздовж виїмок

В результаті проведених досліджень для даного суховантажного судна можна рекомендувати встановлення однієї специфічної виїмки капле образної форми шириною 3% від довжини судна та максимальною глибиною $t = 0,36\%$ від довжини судна на $\bar{l}_v = 0,41$ місце розташування виїмки від довжини судна, починаючи з кормового перпендикуляру або двох виїмок шириною $b = 0,73\%$ від довжини судна при тому ж місці розташуванні для ефективного зниження опору.

З поданих картин візуалізації можна зробити висновок, що виїмка на корпусі судна змінює характер тиску на поверхні цього корпусу. За рахунок виїмки тиск підвищується раніше, що дозволяє наблизити картину тиску до стану судна, яке рухається у ідеальному середовищі.

Для проведення дослідження ефективності виїмок на поверхнях моделі та натурального танкера, в даній роботі був обраний корпус, який зображений на рисунку 4.28. Характеристики корпусів моделі та натурі приведені в таблиці 4.3.

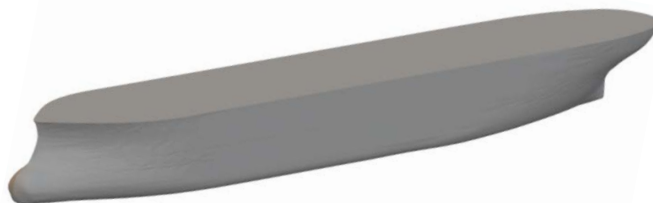


Рисунок 4.28 – Твердотільна модель танкера

Таблиця 4.3

Характеристики корпусів

	Корпус натурі	Корпус моделі
Довжина найбільша	$L_{нб} = 136,37\text{м}$	$L_{нб} = 2,73\text{м}$
Ширина	$B = 16,50\text{м}$	$B = 0,33\text{м}$

У програмному комплексі Solid Works була створена 3D геометрія гладкої моделі і моделі з двома виїмками з шириною 0,76% від довжини судна між перпендикулярами (рис. 4.29) і в результаті встановлення виїмок отримали зниження опору приблизно на 2%.



Рисунок 4.29 – Модель танкера зі встановленими двома виїмками

Після чого варіанти розташування виїмок на моделі, які показали добрий результат, були створені у програмному комплексі SolidWorks та досліджені в програмному комплексі FlowVision для верифікації CFD пакету. Отримані 3D моделі були збільшені до заданих розмірів реального судна. Для цього варіанту було виконано розрахунки опору в результаті чого опір збільшився на 5%. Тому використання цих виїмок на моделі є доцільним, але для натурного судна виїмки з такими параметрами призводять до зворотного ефекту, тому що моделювання виконується за числом Fr , а не Re через неможливість відтворити необхідні швидкості в дослідницькому басейні. Підібравши для даного типу судна виїмки, за отриманими даними з середовища Flow Vision були побудовані криві буксирувального опору в залежності від швидкості. Аналіз отриманих залежностей наведено в зведеній таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Опір великотоннажних транспортних суден в середовищі Flow Vision

Вид судна	Опір судна, кН	Зменшення опору у відсотках, %
Гладкий корпус	138,45	0,00
Корпус з двома виїмками	125,17	9,59

Аналіз отриманих результатів. Спосіб регулювання розподілу тиску на змоченій поверхні судна був застосований до суховантажного судна і

великотонажного транспортного судна з великою повнотою обводів. Аналіз отриманих кривих буксирувального опору в залежності від швидкості показав, що суховантажне судно при швидкості 6 м/с з однією специфічною виїмкою капле образної форми шириною 3% від довжини судна знизило опір на 19%, а дві виїмки на 14%. Для танкера при швидкості 6 м/с з двома виїмками шириною 0,36% від довжини судна знизило опір на 9%.

4.2 Модельне дослідження танкера проекту 005RST01

Перевірка ефективності впливу виїмок на ходові якості судна була виконана на моделі танкера проекту 005RST01, яке пов'язане з виконанням держбюджетної науково-дослідницької роботи (номер державної реєстрації №0117U000347, номер теми 2085). Проект розроблений у ЗАТ "Морське інженерне бюро" (МІБ), м. Одеса. Судно має змішаний район плавання (клас R2, Російський морський Регістр судноплавства), тому для цілей дослідження розглянутий варіант морської осадки $d=4,30$ м. В таблицях 4.5 – 4.6 приведені основні характеристики танкера проекту 005RST01 і його моделі.

Таблиця 4.5

Характеристики танкера проекту 005RST01

Судно		
Довжина між перпендикулярами, м	L_{pp}	132,0
Довжина по ватерлінії при осадці 4.30 м, м	L_{WL}	136,37
Ширина, м	B	16,50
Осадка носом в морських умовах, м	d_n	4,30
Осадка кормою в морських умовах, м	d_k	4,30
Коефіцієнт загальної повноти	C_B	0,889
Коефіцієнт повноти мідель-шпангоута	C_m	0,995

Продовж. табл. 4.5

Коефіцієнт повноти ватерлінії	C_w	0,960
Абсциса центра величини, м	x_c	-0,39
Площа змоченої поверхні при осадці 4.30 м, м ²	S	3147,5
Площа виступаючих частин, м ²	S_{AP}	60
Розрахункова площа бульба, м ²	A_{BT}	8,32
Узвишся центра ваги площі бульба, м	h_B	2,80
Розрахункова площа кормового транця, м ²	A_T	20,05
Довжина носового загострення, м	L_R	16,70
Кут носового загострення ватерлінії, град.	α_1	62,2
Швидкість ходу, вуз.	v_S	10,0

Таблиця 4.6

Характеристики моделі танкера проекту 005RST01

Модель, масштаб 1:50		
Довжина між перпендикулярами, м	L_{PP}	2,64
Довжина по ватерлінії, м	L_{WL}	2,73
Ширина, м	B	0,33
Осадка, м	d_f	0,086
Водомісткість, м ³	V_m	0,069
Площа змоченої поверхні, м ²	S_m	1,259

Модель танкера пр. 005RST01 виготовлена в масштабі 1:50 з пінопласту і покрита сплавом воску з парафіном.

Загальний вид моделі приведений на рисунку 4.30. Кормовий край і днище моделі, носовий край моделі без надбудов представлені на рисунку 4.31 відповідно.

У носовому краї моделі встановлені два турбулізатора з латунного дроту діаметром 1,5 мм у районі носового перпендикуляра і першого теоретичного шпангоута (рис. 4.32).



Рисунок 4.30 – Загальний вид моделі танкера



Рисунок 4.31 – Кормовий край, носовий край і днище моделі танкера

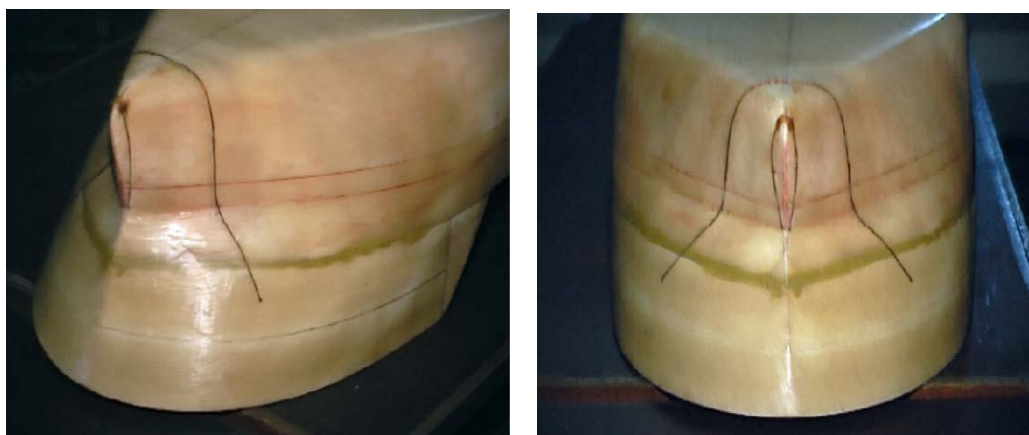


Рисунок 4.32 – Установка турбулізаторів, вид з правого борту та вид з носу
Теоретичне креслення корпусу судна приведено на рисунку 4.33.

Для кріплення даної моделі до буксирувальної системи використовувалося класичне запрягання за схемою "ромб".

Діапазон швидкостей даного судна виключає його рух у режимах, відмінних від водотонажного (проектна швидкість $v_s = 10$ вуз.), тому динамічна тарировка моделі не виконувалася.

Експериментальні дослідження ефективності роботи поперечних виїмок на опір моделі танкера проекту 005RST01 були проведені в два етапи. На першому етапі досліджена ефективність однієї виїмки, розміщеної у носовій і кормовій частинах корпусу моделі. При цьому варіювалися її розміри і форма.

Поперечні виїмки були розміщені в кормовій частині судна на відстані $0,8L$ від носового перпендикуляра. Також був розглянутий один варіант розміщення виїмки в носовій частині корпусу на $0,16L$ від носового перпендикуляра.

На рисунках 4.34 – 4.37 представлені схеми розміщення одиночних поперечних виїмок на корпусі танкера 005RST01.

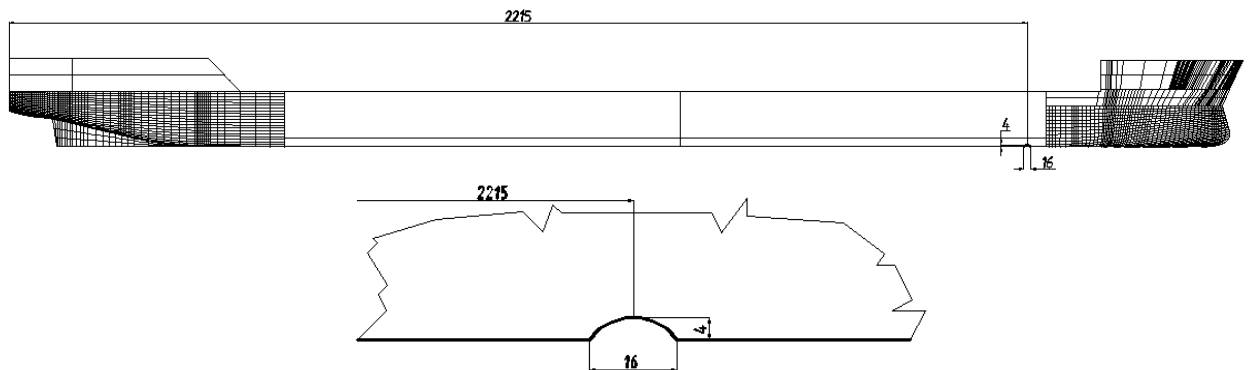


Рисунок 4.34 – Варіант 1. Виїмка 16x4 мм в носовій частині моделі

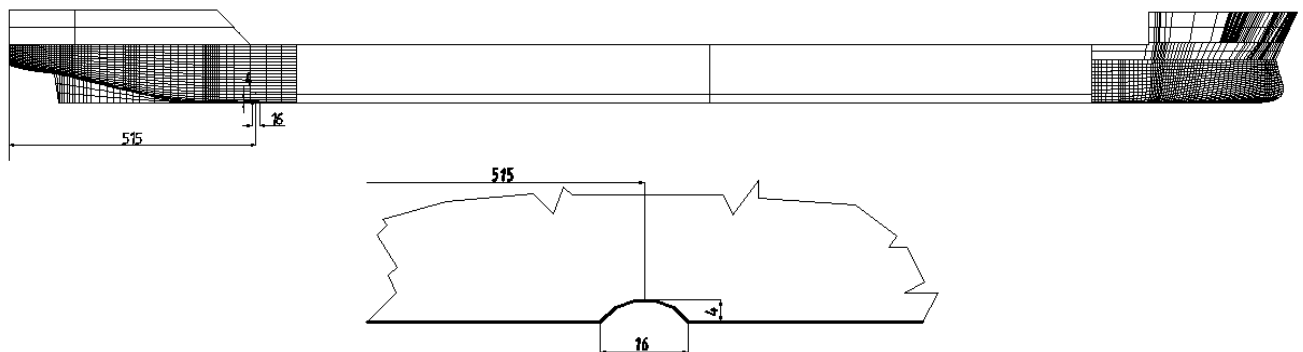


Рисунок 4.35 – Варіант 2. Виїмка 16x4 мм в кормовій частині моделі

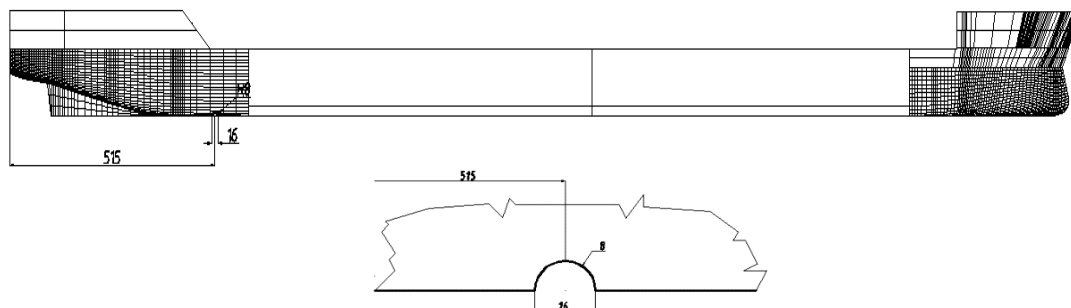


Рисунок 4.36 – Варіант 3. Виїмка 16x8 мм в кормовій частині моделі

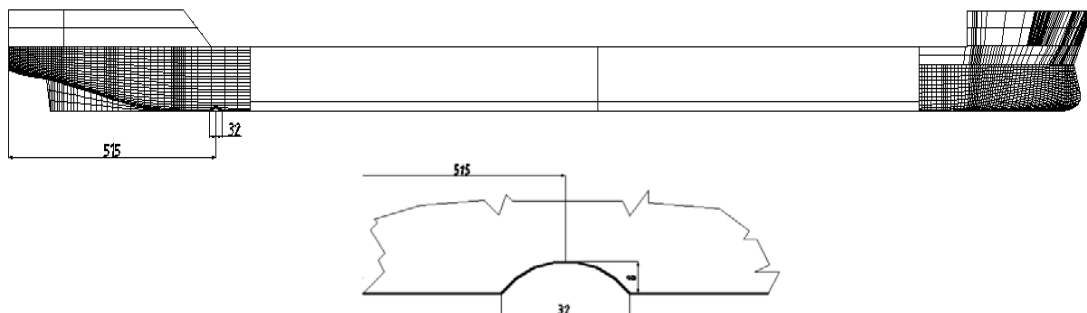


Рисунок 4.37 – Варіант 4. Виїмка 32x8 мм в кормовій частині моделі

На наступному етапі були розглянуті три варіанти комбінацій виїмок збільшених розмірів (рис. 4.38 – 4.40). Послідовна установка поперечних ніш і збільшення розмірів повинні були призвести до створення більш інтенсивної вихрової системи.

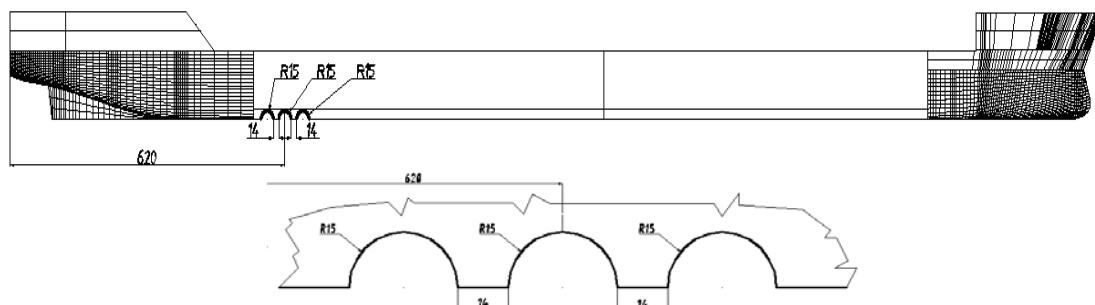


Рисунок 4.38 – Варіант 5. Три виїмки 30x15 мм в кормовій частині моделі

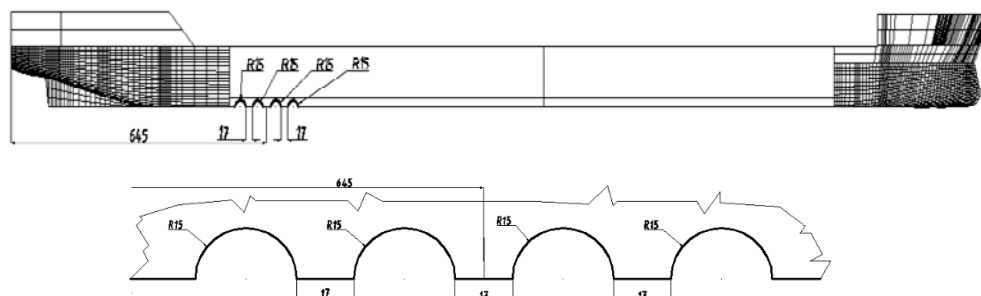


Рисунок 4.39 – Варіант 6. Чотири виїмки 30x15 мм в кормовій частині моделі

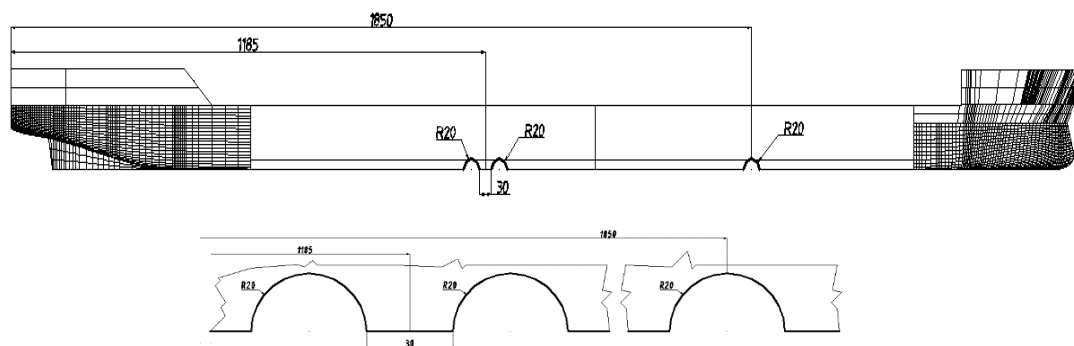


Рисунок 4.40 – Варіант 7. Три виїмки 40x20 мм в середній частині моделі
Загальний вид розглянутих комбінацій поперечних ніш приведений на рисунках 4. 41 – 4.42.

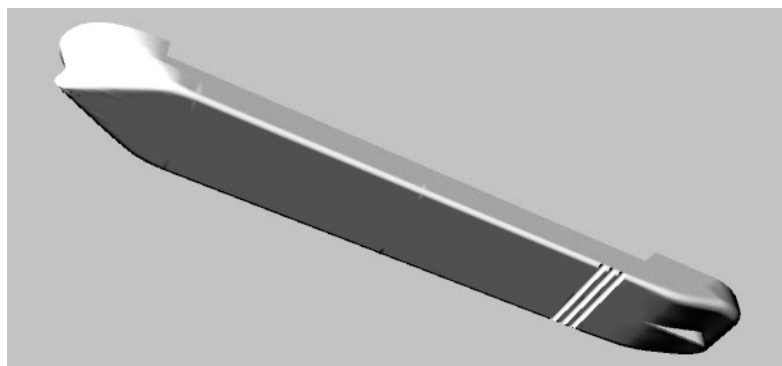


Рисунок 4.41 – Поперечні виїмки на днищі танкеру, варіант 5

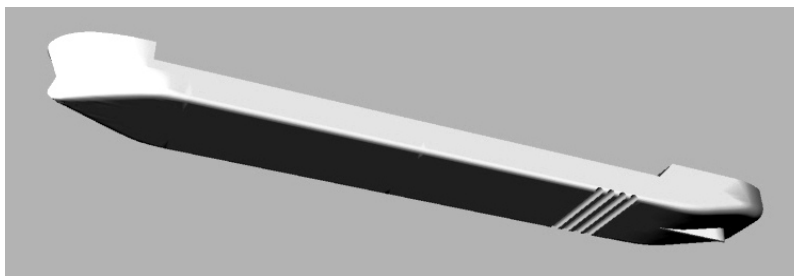


Рисунок 4.42 – Поперечні виїмки на днищі танкера, варіант 6

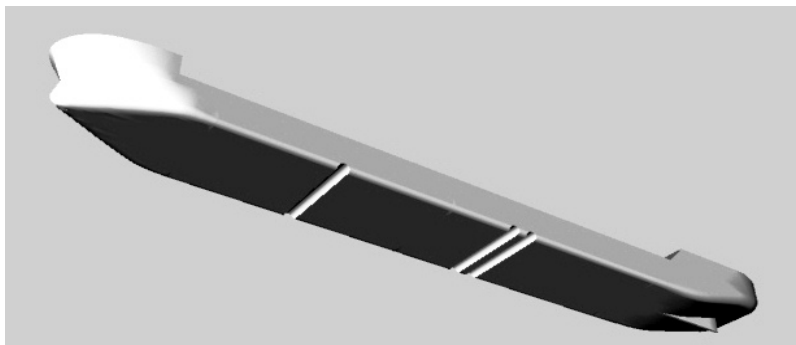


Рисунок 4.43 – Поперечні виїмки на днищі танкера, варіант 7

Результати експериментального визначення буксирувального опору моделі танкера приведені на рисунку 4.45 у залежності від швидкості руху.

Коефіцієнт повного опору моделі отриманий у вигляді:

$$C_m = \frac{2r}{\rho v_m^2 S_m} \quad (4.2)$$

де r – повний опір моделі, кгс; v_m – швидкість руху моделі, м/с; S_m – змочена поверхня моделі, м²; ρ – густина води в басейні, $\frac{\text{кгс} \cdot \text{м}^4}{\text{с}^2}$;

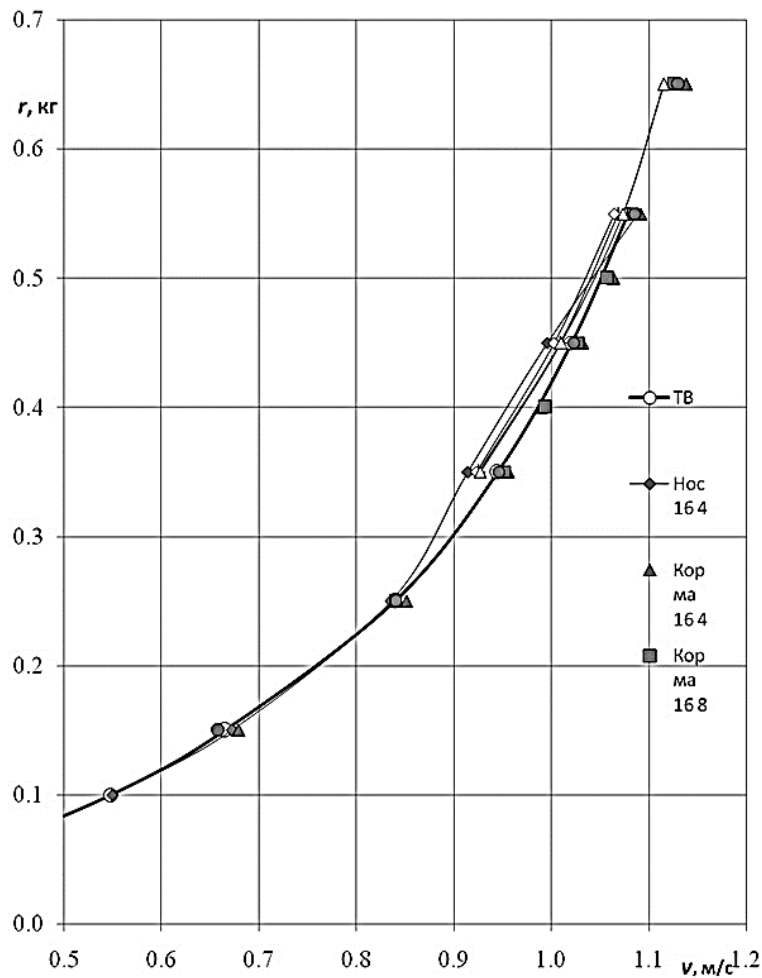


Рисунок 4.45 – Буксирувальний опір танкера на тихій воді

Де $\text{—}\bigcirc\text{—}$ – гладкий корпус; поодинокі поперечні ниші: $\text{—}\blacklozenge\text{—}$ – варіант 1; $\text{—}\blacktriangle\text{—}$ – варіант 2; $\text{—}\blacksquare\text{—}$ – варіант 3; $\text{—}\bigcirc\text{—}$ – варіант 4; $\text{—}\triangle\text{—}$ – варіант 5; $\text{—}\diamond\text{—}$ – варіант 6; $\text{—}\text{+}\text{—}$ – варіант 7.

Залежність коефіцієнта повного опору моделі танкера від числа Фруда приведена на рисунку 4.46.

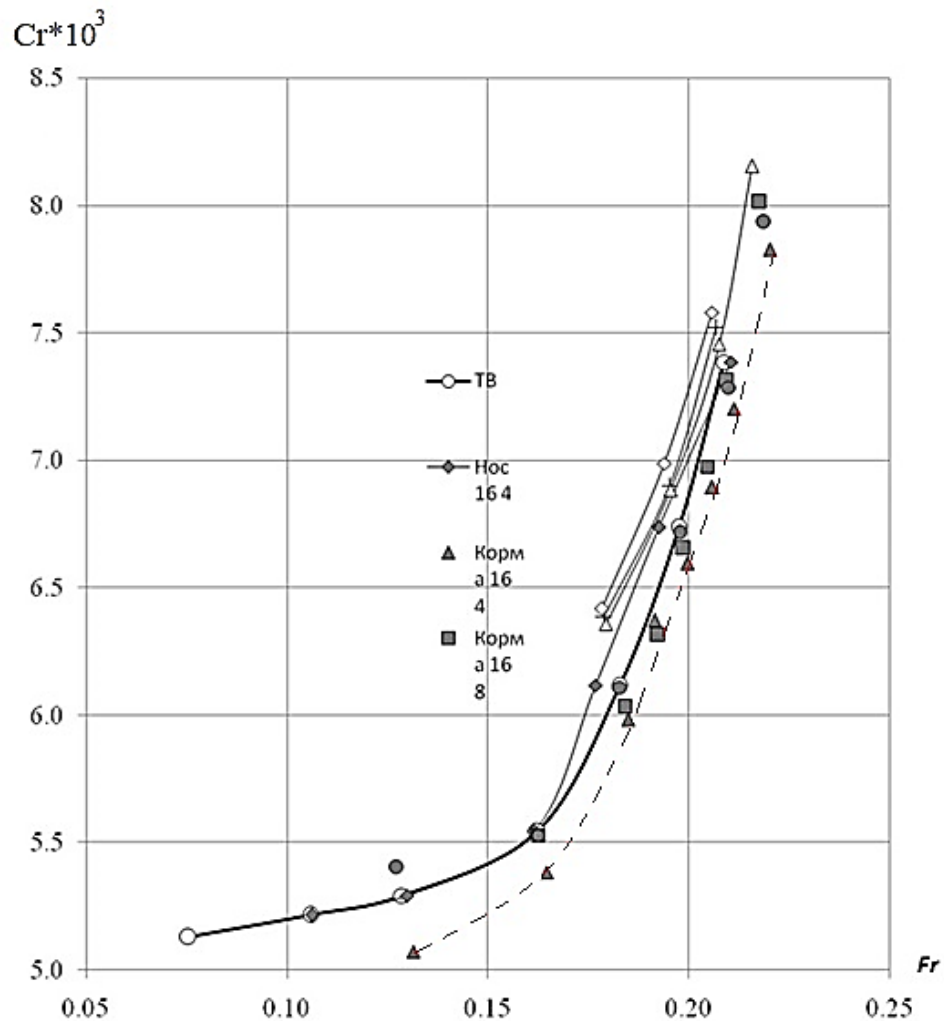


Рисунок 4.46 – Залежність коефіцієнта повного опору моделі танкера від числа Фруда

Де —○— – гладкий корпус; поодинокі поперечні ниші: —◆— – варіант 1; —▲— – варіант 2; —■— – варіант 3; —○— – варіант 4; —△— – варіант 5; —◇— – варіант 6; —⊕— – варіант 7.

Аналіз отриманих у процесі буксирувальних випробувань даних дозволив зробити наступні висновки. У випадку установки одиночних поперечних виїмок ефект зниження буксирувального опору виявлено при розгляді варіанта 2 розміщення виїмок (розміщення виїмки в кормовій частині моделі). Найбільший поперечний розмір виїмки в цьому варіанті складає $b = 16$ мм ($b \approx B/1000$), глибина виїмки $t = 4$

мм ($t = b/4$). Зниження повного опору на величину від 2,5% до 3% спостерігається при швидкості руху моделі від 0,85 до 1,13 м/с, не набагато більш слабкий ефект, показала виїмка збільшеної глибини (варіант 3), також при установці в кормовій частині моделі. Розміри виїмки в цьому варіанті $b = 16$ мм ($b \approx B/1000$), глибина виїмки $t = 8$ мм ($t = b/2$). Зниження повного опору r склало від 1,5% до 2,2% у діапазоні чисел Фруда від 0,18 до 0,21. Одиночна поперечна виїмка збільшеного розміру (варіант 4) показала зниження опору на величину близько 2,5% при числах Фруда від 0,21 і вище. Розміри виїмки в цьому варіанті $b = 32$ мм ($b \approx B/1000$), глибина виїмки $t = 8$ мм ($t = b/4$).

Цікаві дані отримані при випробування моделі з виїмкою, виконаною за варіантом 1 (розміщення виїмки в носовій частині моделі). При швидкості ходу, яка перевищує $Fr = 0,162$, спостерігається помітне збільшення опору до числа $Fr = 0,21$. Далі хід кривої виявляє перспективу значного зниження опору в порівнянні з випадком голого корпусу. Подальше збільшення швидкості руху моделі істотно виходило за рамки специфікаційних значень швидкості, тому, застосовуючи лише якісний аналіз, можна констатувати, що даний варіант розміщення поперечної виїмки буде вигідніший для судна, що рухається в діапазоні швидкостей $Fr = 0,22$ і вище.

На наступних етапах роботи розпочата спроба досліджувати виявлений ефект дії виїмок збільшеного розміру. Для скорочення часу випробувань буксирування моделі проводилося при швидкостях руху моделі, що відповідають діапазону чисел Фруда від 0,175 до 0,21. Усі розглянуті комбінації поперечних виїмок (варіанти 5, 6 і 7) виявили збільшення буксирувального опору. При цьому найбільші відхилення величини опору у бік збільшення склали від 8,7% до 5% при числах Фруда від 0,18 до 0,21 відповідно.

Після чого варіанти розташування виїмок на моделі, які показали добрий результат, були створені у програмному комплексі Solid Works, а отримані 3D моделі були збільшені до заданих розмірів реального судна. Для цього варіанту було

виконано розрахунки опору в програмному комплексі Flow Vision в результаті чого опір збільшився на 5%. Тому використання цих виїмок на моделі є доцільним, але для натурного судна виїмки з такими параметрами приводять до зворотного ефекту, так як моделювання виконується за числом Fr , а не Re через неможливість відтворити необхідні швидкості в дослідницькому басейні. Також слід відмітити, що розміри і місце розташування виїмок для кожного судна необхідно підбирати окремо беручи до уваги характеристики обраного судна.

Підібравши для даного реального судна виїмки, за отриманими даними з середовища FlowVision, були побудовані криві буксирувального опору в залежності від швидкості, в результаті чого отримали зменшення опору для натурного судна на 10%.

4.3 Дослідження впливу виїмок, розташованих на поверхні корпусів підводних човнів

Аналізуючи тенденції досліджень гідродинаміки підводних човнів треба відзначити, що багато робіт присвячено вдосконаленню обтікання їх корпусу [73-79]. Ці дослідження базуються на методах обчислювальної гідродинаміки (CFD) та оцінюють найбільш важливі геометричні параметри, такі як загальна форма голого корпусу, форма корми, форма носової кінцевості та оптимальна величина відношення довжини до діаметру підводного човна. Кожен з цих параметрів допомагає мінімізувати опір і підвищувати гідродинамічну ефективність об'єкту. Для кораблів військового призначення простої зміни формі корпусу, направленої на зниження опору, недостатньо, тому використовують інші різноманітні методи зниження опору [80]. Через природу підводного човна та його експлуатаційного середовища більшість із цих методів не є корисними для підводних човнів. Аналізуючи тенденції досліджень гідродинаміки підводних човнів, слід зазначити, що багато робіт присвячено поліпшенню потоку по поверхні корпусу [81, 82]. У роботі [83] описано вплив параметрів циліндричної вставки на загальний опір та вплив різних форм носової та кормової кінцевостей. У дослідженнях [84] прогнозується та коригується за

допомогою спеціального гумового покриття потік уздовж підводного човна для зменшення опору та гідроакустичного шуму. Запропонована також багатоцільова оптимізація конструкції корпусу підводного човна в роботі [85].

Підводний човен під час свого пересування приводить у рух масу навколишньої води і зазнає при цьому гідродинамічну реакцію на поверхню корпусу. В загальному випадку опір залежить від головних розмірів, коефіцієнтів повноти, форми обводів, стану поверхні корпусу, швидкості і умов руху підводного човна. Опір води розглядається окремо для підводного, надводного, а також для перископного положень підводного човна у зв'язку з особливостями формування гідродинамічних сил в кожному із зазначених режимів руху. Розглянемо складові повного опору для підводного положення (рисуюнок 4.47) [86].



Рисуюнок 4.47 – Співвідношення компонентів опору підводного човна

Для досягнення зменшення опору підводного човна необхідно в зоні зростання тиску вжити спеціальних заходів, які спрямовані на запобігання відриву прикордонного шару і збереження ламінарного режиму обтікання корпусу. Зазвичай, розділення потоку відбувається за кормовою частиною підводного човна. Він утворює гідродинамічний слід, який створює велику зону низького тиску в кормовій частині човна. Товщина гідродинамічного тіла залежить від інтенсивності розділення потоку та обшивки корпусу. Прикордонний шар і розділення потоку відіграють головну роль у гідродинамічному опорі підводного човна. Розділення потоку в ламінарному прикордонному шарі відбувається раніше, ніж в турбулентному прикордонному шарі,

оскільки імпульс турбулентного потоку більший, ніж в ламінарному, і тому його важче відокремити від поверхні тіла. Виїмки впливають на прикордонний шар та зменшують опір двома методами: зменшенням опору тертя (за рахунок зменшення товщини прикордонного шару) та зменшенням опору в'язкого тиску (через пізніше розділення потоку та створення меншої області низького тиску позаду тіла). При правильному виборі місця розташування, форми та кількості поглиблень відбувається перерозподіл тиску на поверхні об'єкта, що може призвести до зниження загального опору підводного човна. Вплив поглиблень на утворення гідродинамічного сліду за підводним човном показано на рис. 4.48.

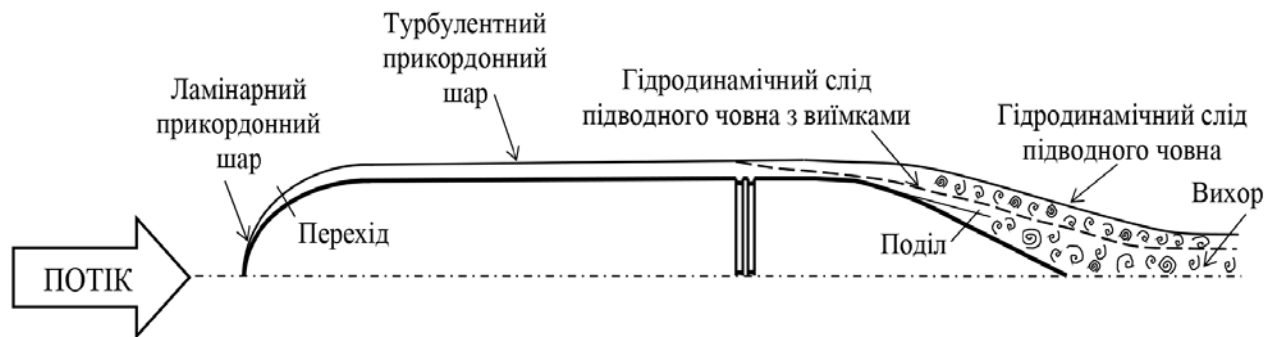


Рисунок 4.48 – Утворення шарів на поверхні підводного човна

Для дослідження ефективності виїмок на поверхні підводних човнів було створено дві твердотільні моделі корпусів ("Ліра" та "Гепард") в CAD системі Solid Works (рис. 4.49 – 4.50). Моделі були створені без рубок та рулів для скорочення часу розрахунків. Основні характеристики обраних моделей підводних об'єктів приведені в таблицях 4.7 – 4.8.

Таблиця 4.7

Підводний човен типу "Ліра"

Водотонажність надводна (підводна)	$m = 2300 (3100) \text{ т}$
Довжина	$L = 81,4 \text{ м}$
Діаметр	$D = 10 \text{ м}$
Максимальна швидкість	$v = 42 \text{ уз}$
Площа змоченої поверхні	$S = 2029 \text{ м}^2$

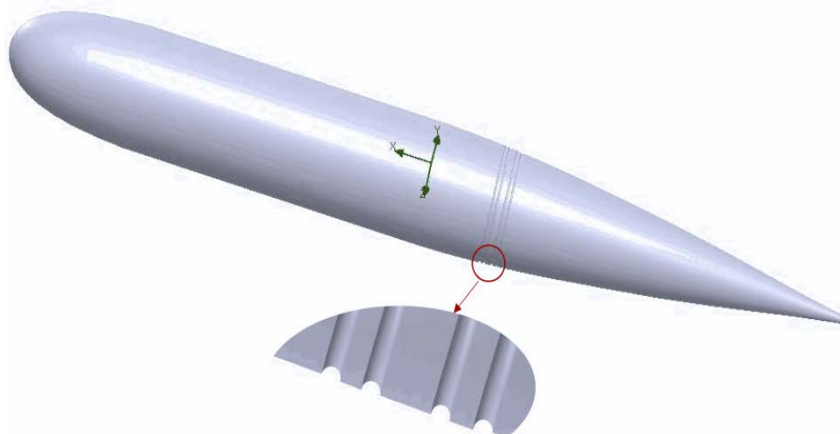


Рисунок 4.49 – Модель підводного об'єкта типу "Ліра" з виїмками

Таблиця 4.8

Підводний човен типу "Гепард"

Водотонажність надводна (підводна)	$m= 6430 (8140) \text{ т}$
Довжина	$L=110,3 \text{ м}$
Діаметр	$D=13,6 \text{ м}$
Максимальна швидкість	$v=33 \text{ уз}$
Площа змоченої поверхні	$S=3932 \text{ м}^2$

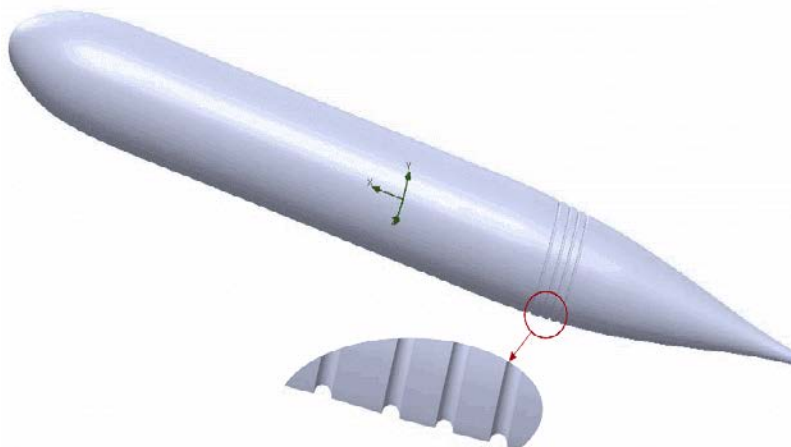


Рисунок 4.50 – Модель підводного об'єкта типу "Гепард" з виїмками

Моделі підводних об'єктів розміщувались у розрахункових боксах, розміри яких були обрані таким чином, щоб не було впливу стінок на результати розрахунку, а саме мінімальні розміри якого становлять до 3 довжин і 5 діаметрів його корпусу. Наступним кроком є встановлення граничних умов на межах обчислювальної області.

Застосовуються такі типи меж: вхід з рівномірним потоком, вільний вихід, симетрія для стінок боксу та стінка для корпусу підводного човна (рис. 4.51).

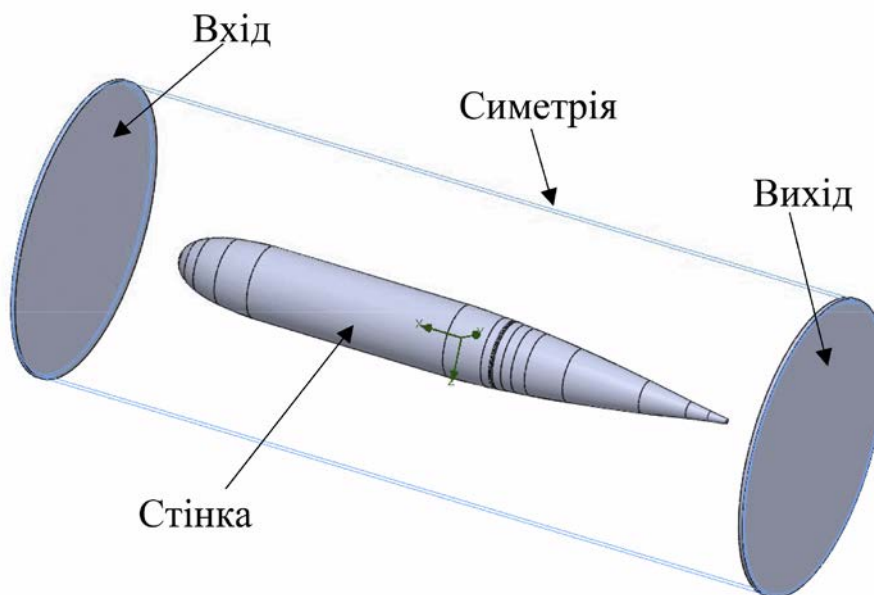


Рисунок 4.51 – Граничні умови на поверхні обчислюваного боксу

На результати CFD моделювання суттєвим чином впливає кількість клітинок розрахункової сітки. Тому перед виконанням варіантних розрахунків було виконано дослідження впливу рівня дроблення глобальної і локальної сітки по поверхні на результат розрахунків. Особлива увага приділялася в районі виїмок, так як великий розмір клітині сітки не дає змогу правильно розрахувати процеси в середині виїмок. Встановлено, що для пакету Flow Simulation рівень подрібнення глобальної сітки повинен бути не менше 4, а локальної сітки на поверхні підводного об'єкта теж не менше 4. При цьому загальна кількість клітинок коливається в межах 1.5 – 1.7 мільйонів.

У програмному пакеті Flow Vision кількість клітинок за рахунок спеціального інструменту локальної адаптації сітки може бути знижена до 1 мільйона. Проте враховуючи технічні можливості другої 32 бітної версії цього пакету практичне використання обмежено 500 – 750 тисячами клітинок.

Розподіл швидкостей та тиску в середині та навколо 4 виїмок які були встановлені на поверхні підводного об'єкта типу «Ліра» зображені на рис. 4.52 – 4.53.

Добре видно, що в середині виїмок утворюється макро-вихор, в середині якого відбувається помітне зниження тиску. Вибір кількості, розмірів та місця розташування виїмок дуже важливий, оскільки неправильний вибір може привести до погіршення умов обтікання та збільшенню опору.

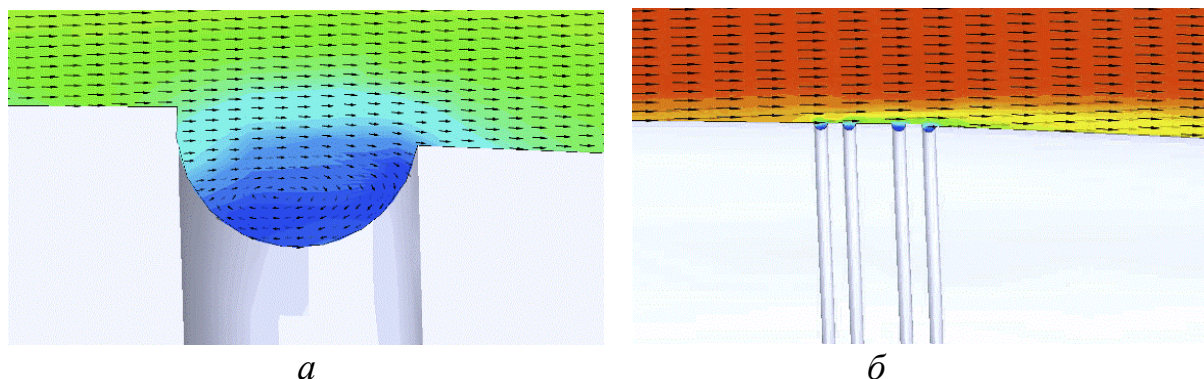


Рисунок 4.52 – Розподіл тиску та швидкості: *а* – швидкості вихору всередині виїмки; *б* – розподіл тиску на поверхні в районі виїмок

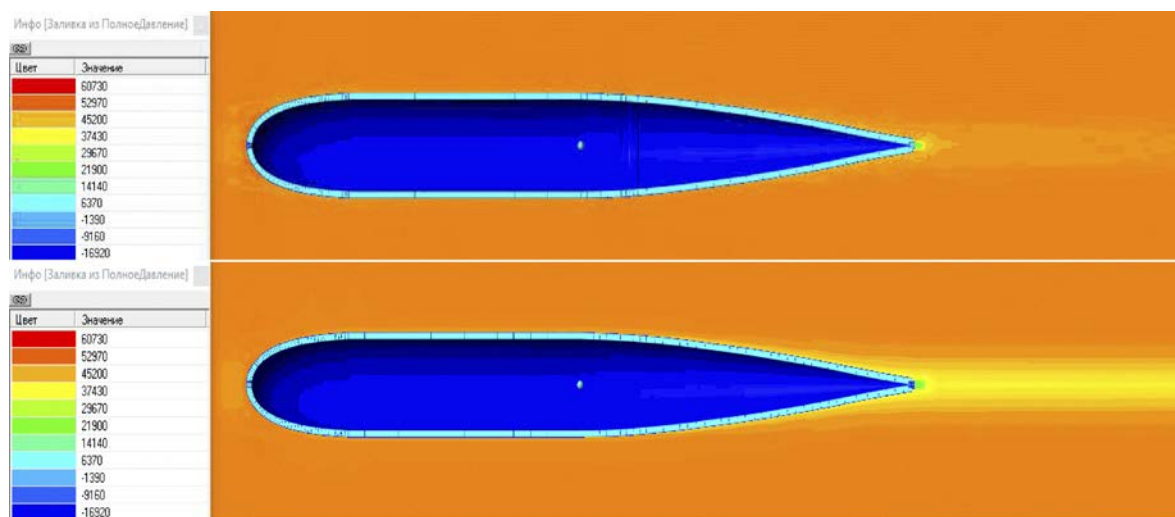


Рисунок 4.53 – Розподіл тиску навколо підводного об'єкта типу «Ліра», з встановленими виїмками та без них

При обтіканні тіл з великими числами Рейнольдса Re спостерігається явище відриву прикордонного шару, що призводить до збільшення діаметру гідродинамічного сліду і до збільшення опору. Виїмки які розташовані в районі точок відриву зменшують прикордонний шар за рахунок пониженого тиску в середині виїмок. Через це точки відриву зміщуються до кормової кінцевості, а діаметр гідродинамічного сліду зменшується.

За результатами розрахунків було побудовано графіки (рис. 4.54 – 4.55) на яких зображена ефективність використання кільцевих виїмок різного діаметру d з фіксованим місцем розташуванням по відношенню до гладких корпусів. Коефіцієнти опору C_x та числа Рейнольдса Re розраховувалися за формулами:

$$C_x = \frac{2R_x}{\rho v^2 S}, \quad (4.3)$$

де R_x – опір підводного об'єкта, Н; ρ – густина води, кг/м^3 ; v – швидкість підводного об'єкта, м/с ; S – площа змоченої поверхні, м^2 ,

$$Re = \frac{v_x D}{\nu}, \quad (4.4)$$

де v_x – швидкість підводного об'єкта, м/с ; $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини; D – діаметр підводного об'єкта, м .

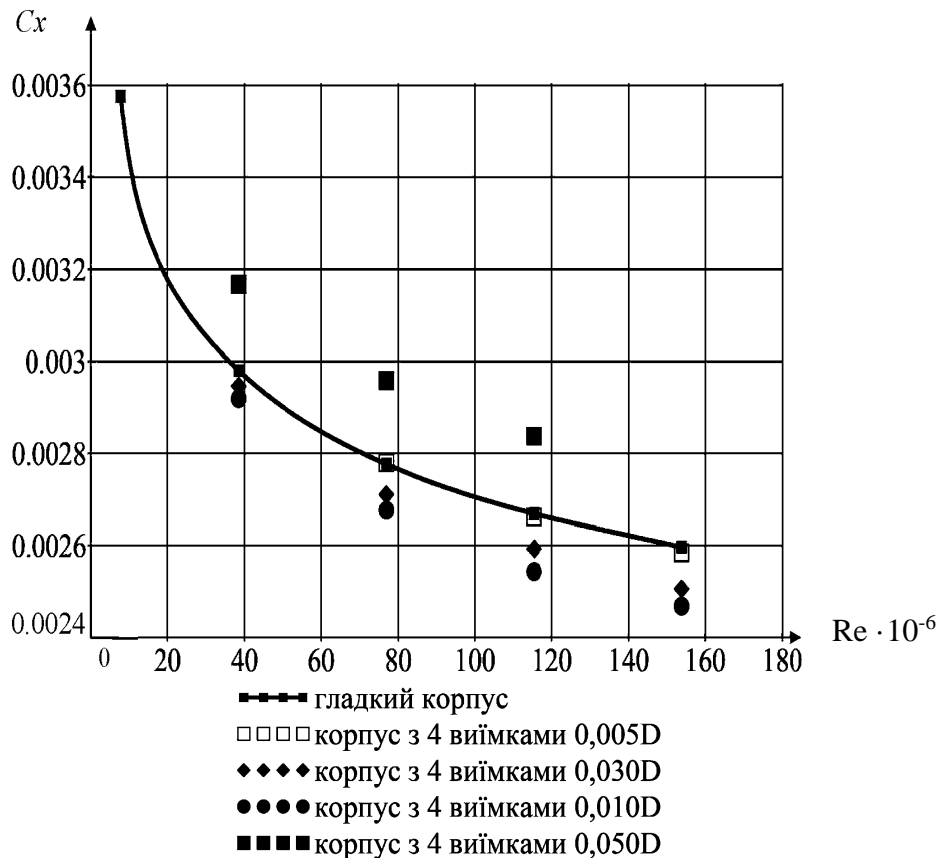


Рисунок 4.54 – Графік залежності коефіцієнта опору C_x від числа Рейнольдса Re і діаметру виїмок d для підводного об'єкта типу «Ліра»

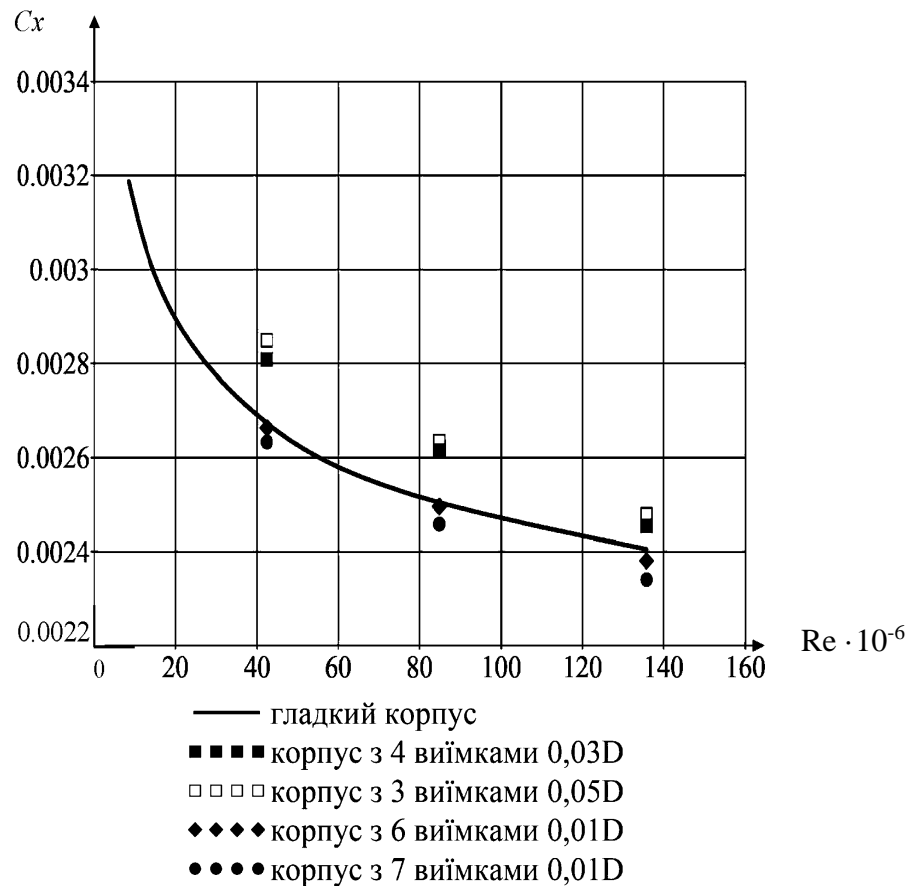


Рисунок 4.55 – Графік залежності коефіцієнта опору C_x від числа Рейнольдса Re , діаметру d і кількості виїмок для підводного об'єкта типу «Гепард»

Аналізуючи отримані графіки залежностей можна зробити наступні висновки, що з гідродинамічної точки зору форма корпусу підводного об'єкта «Гепард» є більш досконалою. Так як при рівних числах Рейнольдса коефіцієнти загального опору «Гепарда» менші ніж у «Ліри» незважаючи на те, що коефіцієнт водотоннажності «Ліри» $C_B = 0,485$ а «Гепарда» $C_B = 0,508$. Найбільший вплив на коефіцієнти опору надає діаметр виїмок, який для всіх розрахунків коливався у межах $d=(0 \div 0,05)D$. Для «Ліри» (рис. 4.54) найбільш ефективними виявилися виїмки діаметром $d=0,01D$, що дозволило при кількості виїмок рівної 4 отримати поступове зменшення коефіцієнту опору з 0 % при $Re=10^7$ до 6 % при $Re=1,5 \cdot 10^8$. Для «Гепарда» (рис. 4.55) найбільш ефективними виявилися виїмки того ж діаметру $d=0,01D$, але їх кількість зросла до 7, а ефективність не перевищує 2 % при $Re=1,35 \cdot 10^8$.

Враховуючи виняткову складність явищ гідродинамічної взаємодії виїмок з корпусом підводних об'єктів в кожному випадку необхідно виконувати варіантні розрахунки впливу параметрів виїмок на коефіцієнти опору і таким чином оцінювати їх ефективність.

Візуалізація розподілу тиску на поверхні об'єктів дослідження представлена на рис. 4.56 – 4.57 в першому наближенні допомагає виконати оцінку місця розташування виїмок і визначенню кількості варіантів розрахунків.

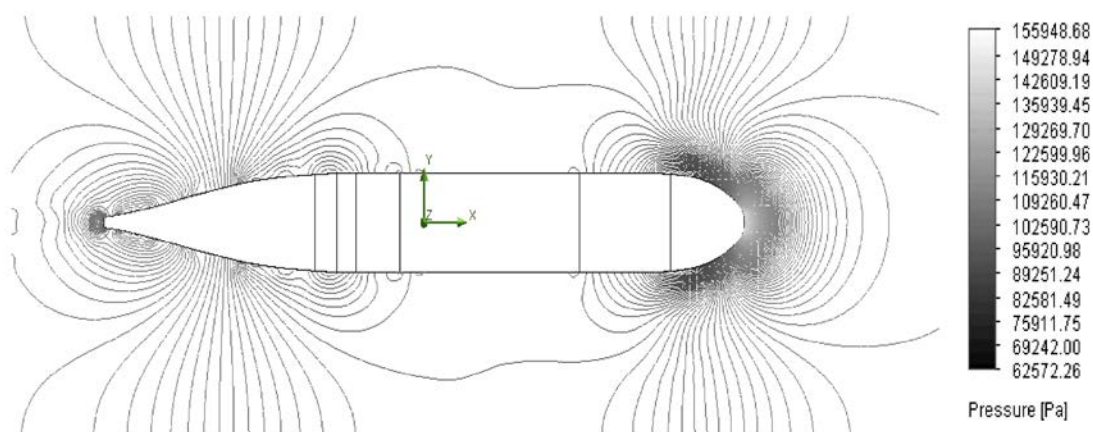


Рисунок 4.56 – Розподіл тиску на поверхні підводного об'єкта

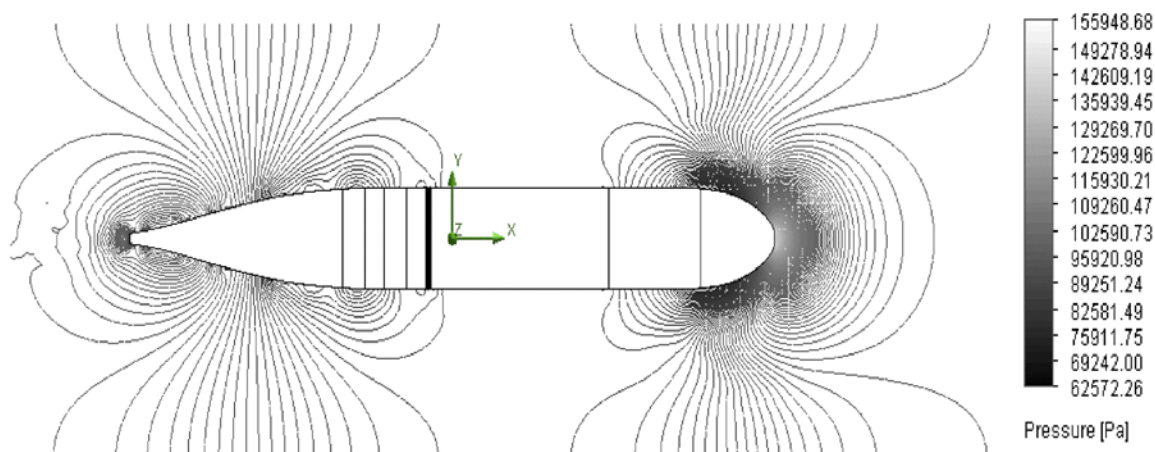


Рисунок 4.57 – Розподіл тиску на поверхні підводного об'єкта з встановленими виїмками

Було виконано порівняння результатів розрахунків підводного об'єкта типу «Ліра» в двох програмних комплексах Flow Vision та Flow Simulation які представленні в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9

**Результати розрахунку підводного човна типу «Ліра» в програмних
комплексах Flow Vision та Flow Simulation**

V, m/s	Підводний човен типу «Ліра» з гладким корпусом		Підводний човен типу «Ліра» з 4 виїмками 0,03D	
	Кількість клітинок розрахункової сітки			
	1621324	185699	1692405	328801
	Flow Simulation	Flow Vision	Flow Simulation	Flow Vision
	Cx			
1	0,003576	0,003283	-	-
5	0,002980	0,002808	0,002947	0,002775
10	0,002776	0,002380	0,002710	0,002323
15	0,002669	0,002566	0,002593	0,002492
20	0,002597	0,002509	0,002506	-

Кількість клітинок розрахункової сітки, що наведена в таблиці 4.9 для Flow Simulation, визначена за результатами спеціальних чисельних експериментів. Ці експерименти полягають в послідовному збільшенні кількості клітинок до тих пір, доки опір руху підводного човна перестає змінюватися. Таким чином встановлено, що 4-й рівень подрібнення глобальної і локальної сіток є достатнім і відповідає кількості клітин наведених в таблиці. Нажаль визначення необхідної кількості клітин таким чином для Flow Vision приводить до практично неприйнятного часу розрахунку, оскільки можливості 2-ї одно процесорної 32 бітної версії цього продукту вкрай обмежені. Але наведені в цій таблиці результати, що отримані в обох програмних продуктах, свідчать про ефект безумовного впливу виїмок на опір підводного човна в напрямку його зниження.

Для перевірки можливості та доцільності використання виїмок було проведено експеримент із буксирування моделі підводного об'єкту сигаро образної форми.

Експеримент виконувався у науково-дослідницькому басейні Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК). Загальна форма та розміри цієї моделі показані на рис. 4.58 – 4.60 [87]. Модель має об'єм 8,38 літра, загальна площа 0,36 м², вага 8,38 кг. Співвідношення L/D становить 13, що знаходиться в межах звичайних L/D великих військово-морських підводних човнів.



Рисунок 4.58 – Загальний вигляд моделі сигаро образної форми

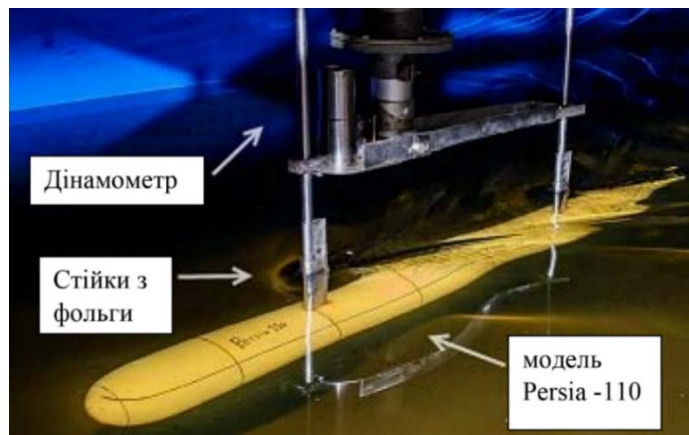


Рисунок 4.59 – Модель сигаро образної форми під час випробувань в науково-дослідному басейні НУК [87]

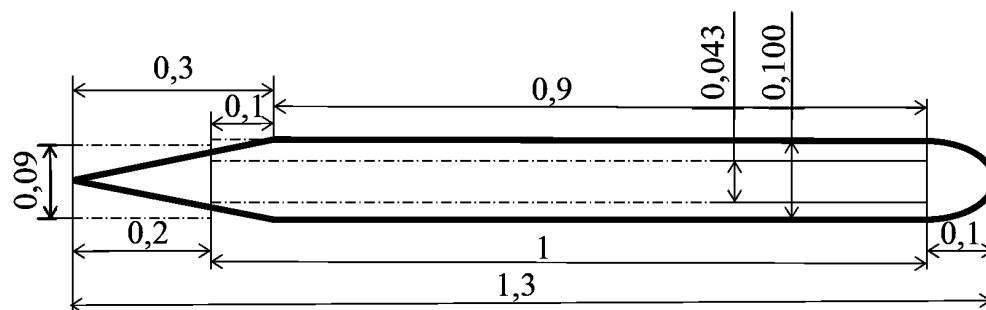


Рисунок 4.60 – Розміри моделі сигаро образної форми

Експеримент проводився у два етапи: на першому етапі виконувався експеримент на моделі без виїмок. На другому етапі – з 4-а виїмками по $0,01D$ (аналогічно рис. 4.54 – випадок 4). Результати представлені в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10

Результати експерименту моделі сигаро образної форми

v , (м/с)	$Re \cdot 10^6$	Без виїмок $R_x(H)$	З виїмками $R_x(H)$	% Зменшення
1	0,0769	1.873	1.864	0.5
1.2	0,0923	2.726	2.707	0.7
1.5	0,1154	4.288	4.245	1
2	0,1539	7.831	7.696	1.7

Отримані результати підтверджують наявність самого ефекту зниження опору за рахунок встановлення виїмок на поверхні моделі сигаро образної форми. Враховуючи те, що числа Рейнольдса модельного експерименту дуже малі, то і сам ефект зниження опору малий (2%). Тому модельні експерименти можуть лише підтвердити наявність цього ефекту, а параметри виїмок можна розраховувати лише в CFD пакетах для натурних об'єктів.

Аналіз отриманих результатів. В програмних комплексах Flow Vision і Flow Simulation для обох підводних об'єктів було створено велику кількість проектів. Розрахунки у всіх проектах виконувалися в однакових умовах з однаковими швидкостями 1–20 м/с. Перед виконанням варіантних розрахунків, було виконано дослідження впливу рівня дроблення глобальної і локальної сітки по поверхні на результат розрахунків. Для підводного об'єкта типу «Ліра» всі корпуси мають по чотири виїмки. Для діаметрів $0,01D$ і $0,03D$ виходить найкращий ККД, а для діаметра $0,05D$ виходить найгірший ККД і призводить до збільшення опору. Для підводного об'єкта типу «Гепард» розглядається різна кількість виїмок. Встановлення 7 виїмок з $0,01D$ має найкращу ефективність, а розташування чотирьох виїмок діаметром $0,03D$

та розташування трьох виїмок діаметром $0,05D$ мають нижчу ефективність. Визначена максимальна ефективність встановлення виїмок діаметром $d=0.01D$ на «Лірі» в 6 % зменшення коефіцієнту опору при $Re=1,5 \cdot 10^8$ і кількості виїмок в 4 та 2 % для «Гепарда» при $Re=1,35 \cdot 10^8$ кількості виїмок в 7 одиниць. Результати модельного експерименту підтверджують наявність самого ефекту зниження опору за рахунок встановлення виїмок на поверхні моделі сигаро образної форми. Враховуючи те, що числа Рейнольдса модельного експерименту дуже малі, то і сам ефект зниження опору малий (2%). Тому модельні експерименти можуть лише підтвердити наявність цього ефекту, а параметри виїмок можна розраховувати лише в CFD пакетах для натурних об'єктів.

Висновки по розділу 4. Узагальнюючи матеріали розділу, варто виділити наступні результати:

1. На днищовій поверхні суховантажного судна було встановлено декілька варіантів виїмок різної форми, отримані моделі було досліджено в програмному комплексі Flow Vision. Аналізуючи отримані результати можна відмітити, що встановлені виїмки змінюють розподіл тиску на поверхні обраного корпусу. А саме тиск підвищується в кормовій частині, що дозволяє наблизити картину розподілу тиску до розподілу в ідеальній рідині. В середині локального поглиблення створюється вихровий рух в якому тиск понижується, що дозволяє зменшити товщину прикордонного шару.

2. Виконана перевірка ефективності впливу виїмок на ходові якості судна на прикладі моделі танкера який досліджувався в оптовому басейні Одеського Національного Морського Університету. Досліджувався вплив параметрів та місця розташування виїмок на днищовій поверхні моделі. Найкращій результат показала одиночна поперечна виїмка, яка дозволила знизити опір на величину від 2,5% до 3% при швидкості руху моделі від 0,85 до 1,13 м/с, що відповідає діапазону чисел Фруду від 0,165 до 0,22. Розміри виїмки в цьому варіанті ширина $b=16$ мм, глибина виїмки $t=4$ мм ($t=b/4$).

3. Варіанти розташування виїмок на моделі, які показали добрий результат, були створені у програмному комплексі SolidWorks, а отримані 3D моделі були збільшені до заданих розмірів реального судна. Для цього варіанту було виконано розрахунки опору в програмному комплексі FlowVision в результаті чого опір збільшився на 5%. Тому використання цих виїмок на моделі є доцільним, але для натурального судна виїмки з такими параметрами приводять до зворотного ефекту, так як моделювання виконується за числом Fr , а не Re через неможливість відтворити необхідні швидкості в дослідницькому басейні. Також слід відмітити, що розміри і місце розташування виїмок для кожного судна необхідно підбирати окремо беручи до уваги характеристики обраного судна.

4. Аналіз розрахункових кривих буксирувального опору в залежності від швидкості показав, що суховантажне судно при швидкості 6 м/с з однією специфічною виїмкою шириною 3% від довжини судна знизило опір на 19%, а великотоннажне транспортне судно з великою повнотою обводів при швидкості 6 м/с з двома виїмками шириною 0,36% від довжини судна знизило опір на 9%.

5. В програмних комплексах Flow Vision і Flow Simulation для підводних об'єктів типу «Лира» та «Гепард» було створено велику кількість проектів. Визначена максимальна ефективність встановлення виїмок діаметром $d=0.01D$ на «Лірі» в 6 % зменшення коефіцієнту опору при $Re=1,5 \cdot 10^8$ і кількості виїмок в 4 одиниць та 2 % для «Гепарда» при $Re=1,35 \cdot 10^8$ кількості виїмок в 7 одиниць.

5. Результати модельного експерименту підводного об'єкту сигаро образної форми підтверджують наявність самого ефекту зниження опору за рахунок встановлення виїмок на його поверхні. Враховуючи те, що числа Рейнольдса модельного експерименту дуже малі, то і сам ефект зниження опору малий (2%). Тому модельні експерименти можуть лише підтвердити наявність цього ефекту, а параметри виїмок можна розраховувати лише в CFD пакетах для натурних об'єктів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше:

- науково обґрунтована та доведена можливість зменшення опору різних типів суден шляхом розміщення специфічних виїмок на їх поверхнях за допомогою сучасних методів обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу впливу розмірів, форми, місця розташування, кількості і швидкості руху, що дозволяє знизити опір від 2 до 20% для $Re=1,3 \cdot 10^8 \div 5 \cdot 10^8$ і якщо виїмки розташовані на відстані в 40% довжини судна починаючи з кормового перпендикуляру;

- за ініціативою і рекомендаціями автора в науково-дослідних басейнах було виконано експериментальні дослідження впливу виїмок на опір руху моделей надводного судна і підводного об'єкта та отримано наступні результати: помітного ефекту зниження опору руху моделей з масштабованими виїмками не виявлено, що свідчить про необхідність проведення параметричного аналізу впливу розмірів, форми, місця розташування і кількості виїмок саме для модельних чисел Рейнольдса; експериментальні випробування варіантів виїмок дозволили визначити їх характеристики, які сприяли зниженню опору моделі надводного судна на 3% та підводного об'єкта на 2%; шляхом порівняння отриманих експериментальних результатів з чисельними розрахунковими методами і засобами обчислювальної гідродинаміки доведена їх добра збіжність.

Результати досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:

Боднарчук Ю. С., (2013), Эффективность кормовой профилированной выемки для снижения сопротивления воды движению судна / Ю. М. Король, Ю. С. Боднарчук// Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування, №4, рр.21-24. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

Боднарчук Ю. С., (2020), Інноваційний засіб зменшення опору суден і об'єктів океанотехніки / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Винахідник і раціоналізатор, №2 (131), рр.22-23. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

Боднарчук Ю. С., (2020), Study of the influence of recesses on the resistance to the motion of submarines by methods of computational hydrodynamics/ Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король, М. І. Мунесан// Східно-Європейський журнал передових технологій, №5 (107), pp.2-22. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

Боднарчук Ю. С., (2013), Моделирование активного управления пограничным слоем в CFD пакете Flow Vision / Ю. С. Боднарчук// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю – Миколаїв, С. 50-51.

Боднарчук Ю. С., (2013), Исследование эффективности кормовой профилированной выемки для снижения сопротивления судна / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// IV міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 405-406. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків та співставлення отриманих розрахунків)*

Боднарчук Ю. С., (2014), Снижение вязкостных составляющих сопротивления судна при помощи кормовых профилированных выемок / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю – Миколаїв, С. 8-9. *(здобувачу належить CFD моделювання руху судна з встановленими виїмками та параметричний аналіз характеристик виїмки)*

Боднарчук Ю. С., (2014), Зниження опору руху тіла за допомогою пристроїв активного керування прикордонним шаром / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// V міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 384-385. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків та співставлення отриманих розрахунків)*

РОЗДІЛ 5

ЗАСТОСУВАННЯ CFD ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ЗНИЖЕННЯ ОПОРУ НА ШВИДКІСНИХ СУДНАХ

5.1 Ефективність кормової профільованої виїмки для зниження опору води під час руху швидкісних суден

Аналіз основних тенденцій розвитку швидкісного флоту показав, що в найближчі роки будуть домінувати обводи типу "глибоке V" завдяки вдалій сукупності експлуатаційних якостей, поєднаних з простотою конструкції корпусу [88-90]. На сьогоднішній день активно досліджуються та використовуються редани, які дозволяють поліпшити остійність судна на ходу, впливаючи на бортову і кильову хитавиці, зменшуючи змочену поверхню корпусу, а отже, і опір руху судна. Також можна спостерігати активне впровадження систем та механізмів на катерах як наслідок великого поширення компактних систем електронного управління. Досліджується вплив інтерцепторів на гідродинамічну якість глісуючого судна із застосуванням експериментального метода. Активно виконується гідродинамічне моделювання глісуючих корпусів зі створенням повітряної порожнини. Усі ці вище описані тенденції потребують значного ускладнення технології побудови судна, або суттєвих енергетичних та фінансових затрат, тому кормова профільована виїмка є перспективною через простоту її конструкції.

Під час глісирування судно розташовується над поверхнею води, торкаючись її тільки невеликою ділянкою днища. Воно підтримується в такому положенні завдяки гідродинамічному тиску, що виникає як реакція відкидання вниз мас води та чинному тиску на змоченій ділянці днища. Схема дії основних сил на днище глісуючого катера показана на рис. 5.1 [91]. На рис. 5.1 (б) представлена спрощена схема сил і моментів, що діють на глісуюче судно на ходу. Рівновага визначається величиною і взаємним розташуванням чотирьох основних сил: маси судна D , сили підтримки Y , тяги

гребного гвинта T , опору води руху судна R . Сили D і Y створюють момент M_{YD} , диферент судна на ніс. Цей момент при сталому русі врівноважується рівним за величиною та протилежним за напрямком моментом M_{TR} сил T і R . φ – кут ходового диференту, який залежить від розташування центру тяжіння, кута кілеватості і подовження глісуючої ділянки днища.

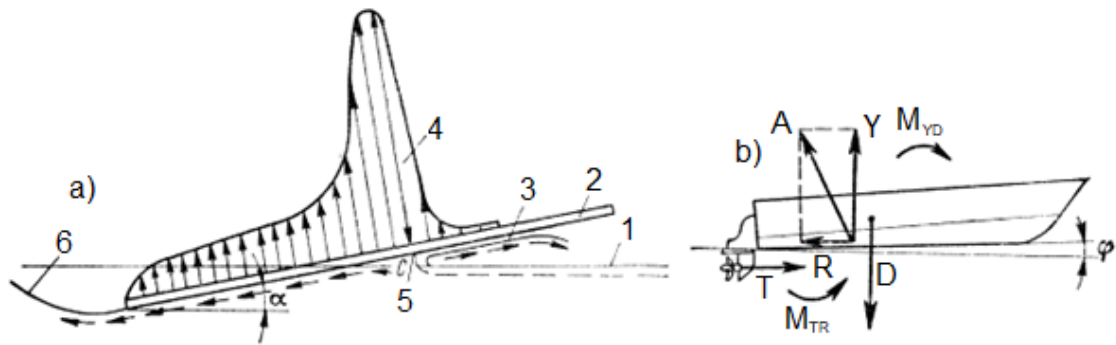


Рисунок 5.1 – Схема дії гідродинамічного тиску на глісуючу пластину (а) і сили на днище глісуючого катера (b) [91]: 1 – поверхня води; 2 – пластина; 3 – бризговий струмінь, що відкидається по ходу; 4 – епюра гідродинамічного тиску; 5 – точка C , в якій швидкість потоку дорівнює 0, а тиск має максимальну величину; 6 – хвильова впадина

При встановленні профільованої виїмки на поверхні глісуючого судна утворюється макровихор, всередині якого швидкість зменшується, за рахунок чого в центрі тиск знижується. Розподіл в'язкісної напруги вздовж поверхні глісеру наведені на рис. 5.2 – 5.3.

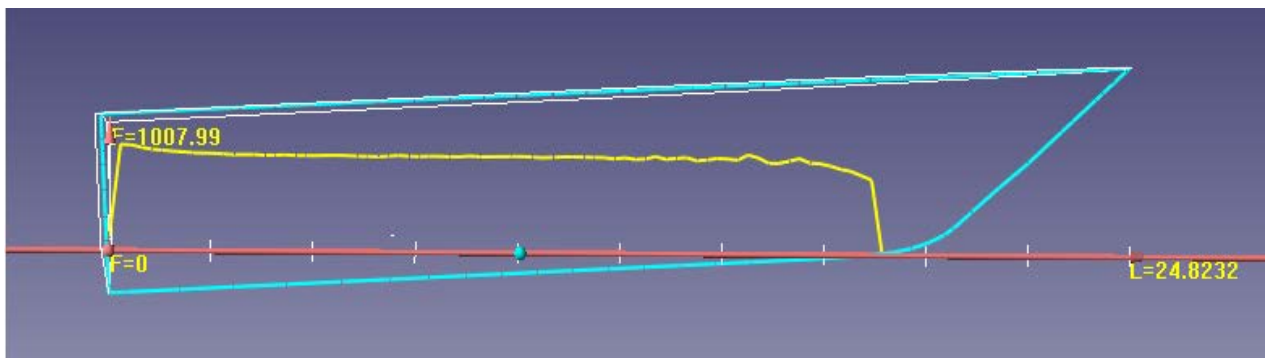


Рисунок 5.2 – Розподіл в'язкісної напруги вздовж поверхні глісеру

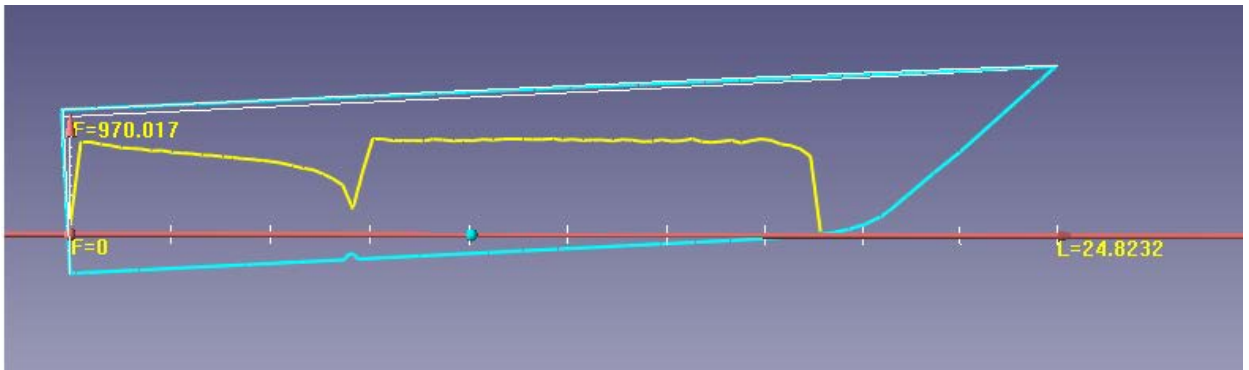


Рисунок 5.3 – Розподіл в'язкісної напруги вздовж поверхні глісеру з виїмкою

Розглянувши картину розподілу в'язкісної напруги вздовж наведених корпусів, можна зробити висновок, що виїмка на корпусі судна змінює характер тиску на поверхні даного корпусу.

Для дослідження ефективності профільованої виїмки на поверхнях швидкісних суден було розглянуто два варіанти суден з виїмками (рис. 5.4).

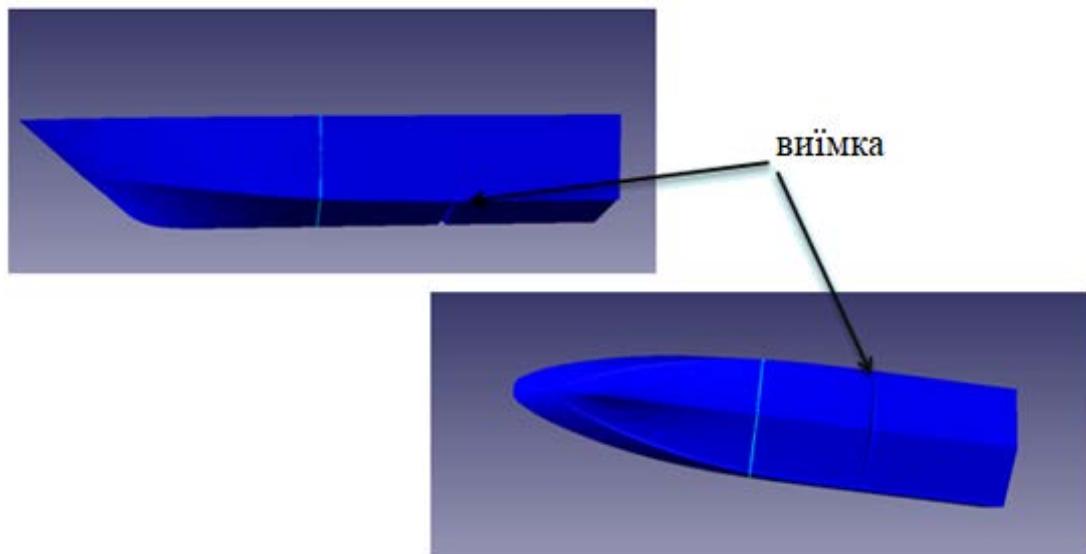


Рисунок 5.4 – Корпус глісуючого судна зі встановленою виїмкою

В обох випадках діаметр лунки був прийнятий 7,8% від висоти борту. Місце розміщення у першому випадку на $\bar{l}_v = 0,73$ від довжини судна, починаючи з носового перпендикуляру ($\bar{l}_v = l_v / L_{\text{нб}}$), в другому – на $\bar{l}_v = 0,65$. Основні характеристики поверхні корпусу наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Основні характеристики поверхні корпусу

Найбільша довжина судна	$L_{\text{нб}} = 25 \text{ м}$
Висота борту судна	$B = 6 \text{ м}$
Ширина судна	$H = 4 \text{ м}$
Осадка судна	$d = 1 \text{ м}$

Розрахунок виконувався у CFD пакеті Flow Vision. Бокс і твердотільні моделі корпусів глісуючих суден створювалися в CAD системі SolidWorks і зберігалися експортом у форматі STL. Модель корпусу глісера завантажувалась в Flow Vision через фільтр рухливого тіла. Була обрана математична модель "вільна поверхня", в якій рівняння Рейнольдса будуть доповнені рівняннями k-ε моделі турбулентності і рівнянням для функції VOF, що моделює вільну поверхню. Початкова сітка мала 152181 клітинок і заданий 2-й рівень адаптації сітки поблизу твердої поверхні корпусу. В випадку розрахунків глісеру з виїмкою було виконано локальне подрібнення сітки в районі лунки.

Спочатку всі корпуси досліджувалися в однакових умовах, без врахування впливу вільної поверхні. Цей розрахунок проводиться як попередній аналіз впливу виїмки на глісуюче судно у зв'язку з досить довгим часом, який необхідний для розрахунку моделі з вільною поверхнею. Нижче наведена таблиця залежності коефіцієнту опору руху глісерів від числа Рейнольдса (таб. 5.2). Коефіцієнти опору C_r та числа Рейнольдса Re розраховувалися за формулами:

$$C_r = \frac{2R_x}{\rho v^2 S}, \quad (5.1)$$

де R_x – опір катера, кН; ρ – щільність води, кг/м³; v – швидкість катера, м/с; S – площа змоченої поверхні, м².

$$Re = \frac{vL}{\nu}, \quad (5.2)$$

де L – довжина катера, м; $\nu = 1,3 \cdot 10^6$, м²/с – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини.

Таблиця 5.2

Графік залежності коефіцієнта опору руху глісерів від числа Рейнольдса

$Re \cdot 10^{-6}$, [кН]	C_r (гладкий корпус)	Розташування виїмки	
		C_r при $\bar{l}_v=0,73$	C_r при $\bar{l}_v=0,65$
111,47	0,0125	0,0089	0,0088
143,3	0,0124	0,0090	0,0089
238,85	0,0124	0,0100	0,0097
318,47	0,0137	0,0109	0,0106
398,089	0,0123	0,0100	0,0094
477,71	0,0122	0,0098	0,0091
557,33	0,0122	0,0097	0,0088

Далі всі корпуси досліджувалися в однакових умовах, з урахуванням впливу вільної поверхні. Нижче наведено графік залежності коефіцієнта опору руху суден від числа Рейнольдса (рис. 5.5).



Рисунок 5.5 – Графік залежності опору руху глісерів від числа Рейнольдса з урахуванням впливу вільної поверхні

Аналізуючи отримані результати, представлені на рисунку 14, можна зробити висновок, що максимальний ефект спостерігається при $Re=15 \cdot 10^7 \div 24 \cdot 10^7$ опір знизився на 14%, далі з ростом Re ефект зменшується, а в діапазоні $Re=28 \cdot 10^7 \div 40 \cdot 10^7$ він майже відсутній, при $Re=48 \cdot 10^7 \div 56 \cdot 10^7$ опір знизився на 12%, тобто сам ефект суттєво залежить від числа Рейнольдса. Розподіл тиску вздовж поверхні глісеру представлений на рис. 5.6 – 5.7.

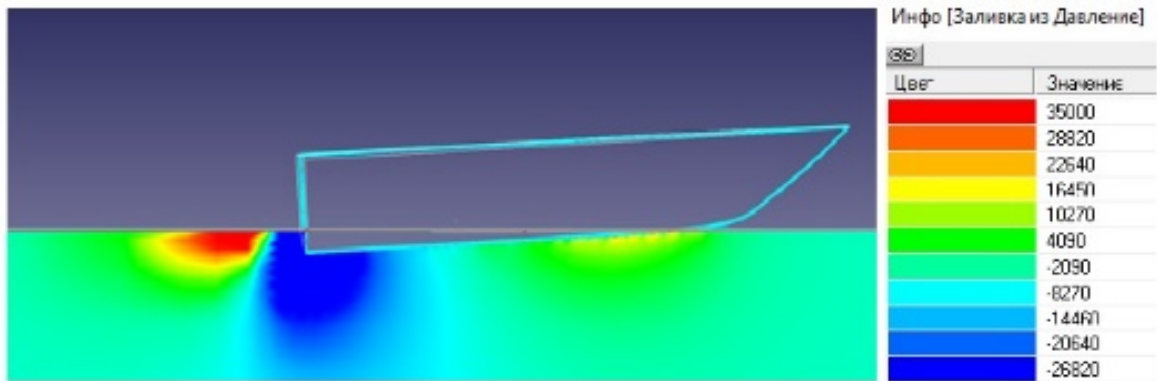


Рисунок 5.6 – Розподіл тиску вздовж поверхні глісеру

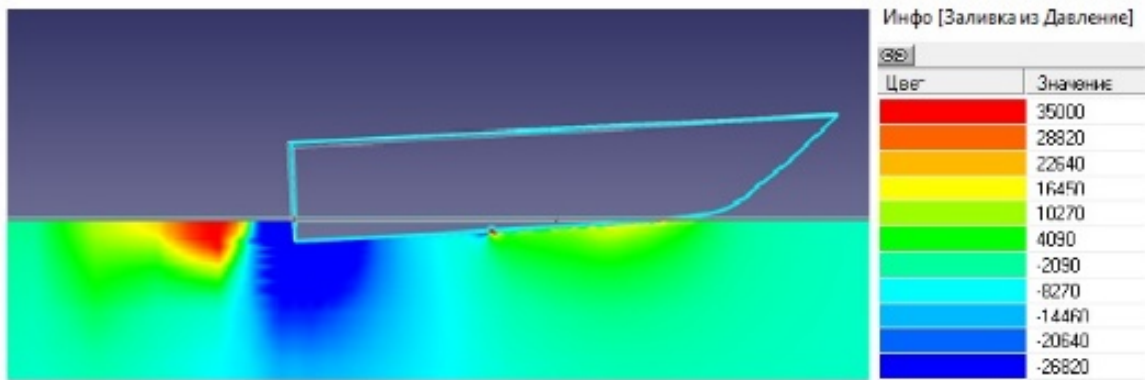


Рисунок 5.7 – Розподіл тиску вздовж поверхні глісеру з виїмкою

Аналіз отриманих результатів. Для дослідження ефективності кормової профільованої виїмки на поверхні швидкісного катера виконувалися два типи розрахунків: без врахування вільної поверхні для виявлення ефекту та з вільною поверхнею. Розрахунки показали, що при розташуванні виїмок на $\bar{l}_v=0,73$ від довжини судна, починаючи з носового перпендикуляру та діаметром 7,8% від висоти борту опір судна знижується до 14% в діапазоні $Re=15 \cdot 10^7 \div 56 \cdot 10^7$.

5.2 Зниження опору води під час руху погано обтічного тіла за допомогою пристроїв активного керування прикордонним шаром

Для зниження опору тертя перспективними вважаються методи, які впливають на прикордонний шар, оскільки саме опір тертя становить найбільшу частину повного опору середніх і великих помірно швидкохідних суден. Одним з таких методів є створення повітряного мастила (рис. 5.8) [92]. Ідея полягає в подачі повітря по спеціальних каналах на поверхню корпусу для створення тонкої повітряної плівки товщиною 1-2 см, що покриває днище і знижує опір, оскільки повітря має меншу густину і в'язкість в порівнянні з водою.

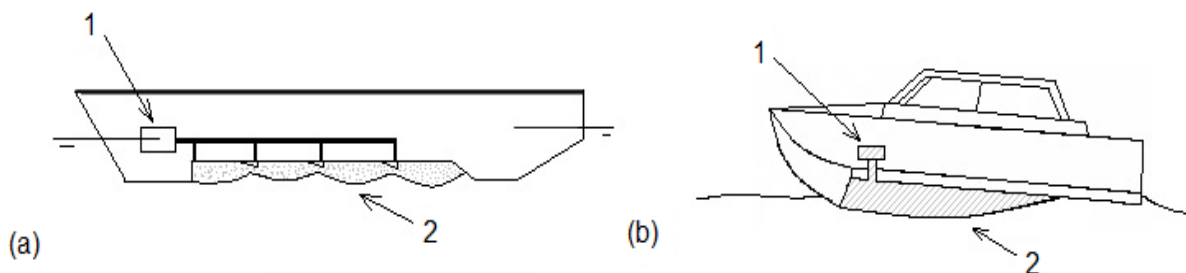


Рисунок 5.8 – Типи повітряного мастила на днищевій поверхні судна [92]:

1 – прилад подачі повітря; 2 – повітряне мастило

Здебільшого комплексна подача повітря використовується для водотонажних корпусів (рис. 5.8, а), для глісуючих суден використовується подача повітря однією хвилею (рис. 5.8, б). Більш складні системи повітряного мастила можуть застосовуватися для складних форм корпусів (напівзаглиблених суден та ін.). Далі представлена спрощена схема корпусу з використанням даного методу і підводна фотографія повітряного мастила під цим корпусом (рис. 5.9) [93].

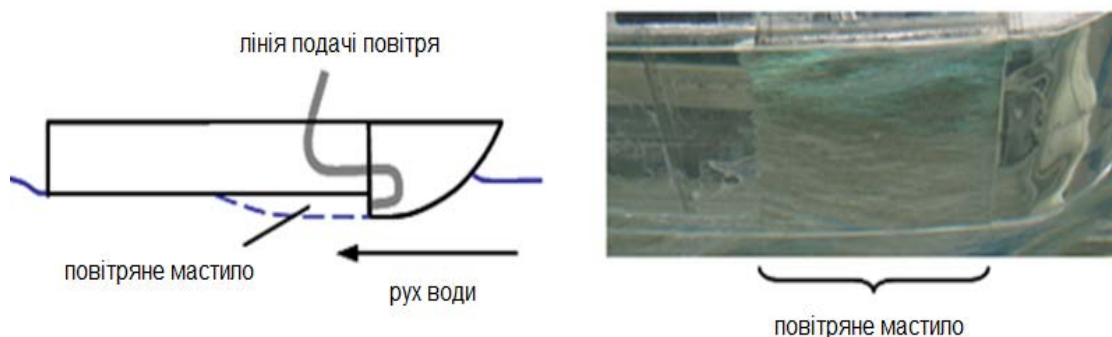


Рисунок 5.9 – Спрощена схема корпусу і підводна фотографія під ним [93]

За допомогою програмного комплексу Flow Vision спочатку було змодельоване обтікання гладкого погано обтічного тіла, яке є первинною моделлю, з якою порівнюються подальші результати. Наступним етапом стало дослідження первинної моделі зі встановленою на її днищевій поверхні спочатку сходинки, потім виїмки. Слід відзначити, що вже на цьому етапі виїмка показала кращий результат за сходинку, зниження опору на 8%. Після отриманих результатів було змодельоване утворення повітряного змащення у випадку його подачі за сходинкою, встановленою на поверхні погано обтічного тіла (рис. 5.10).

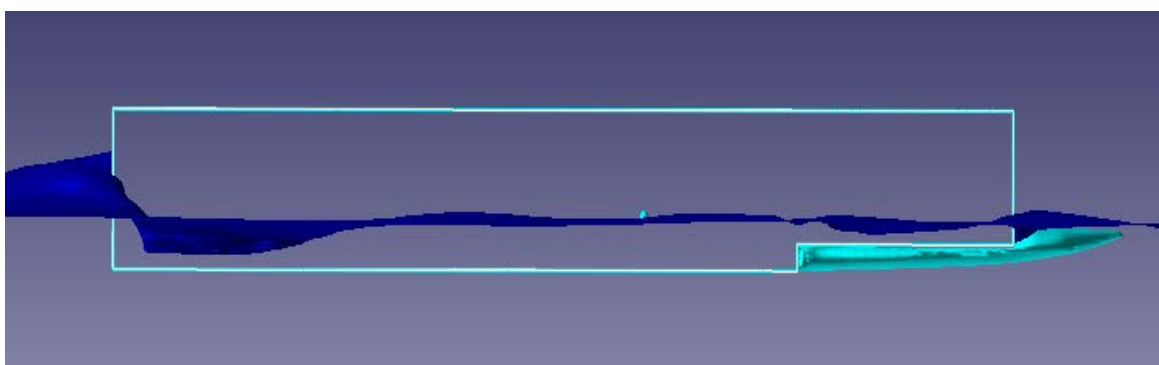


Рисунок 5.10 – Візуалізація утворення повітряного змащення за сходинкою

Далі було змодельоване утворення повітряного змащення у випадку його подачі з профільованої виїмки (рис. 5.11).

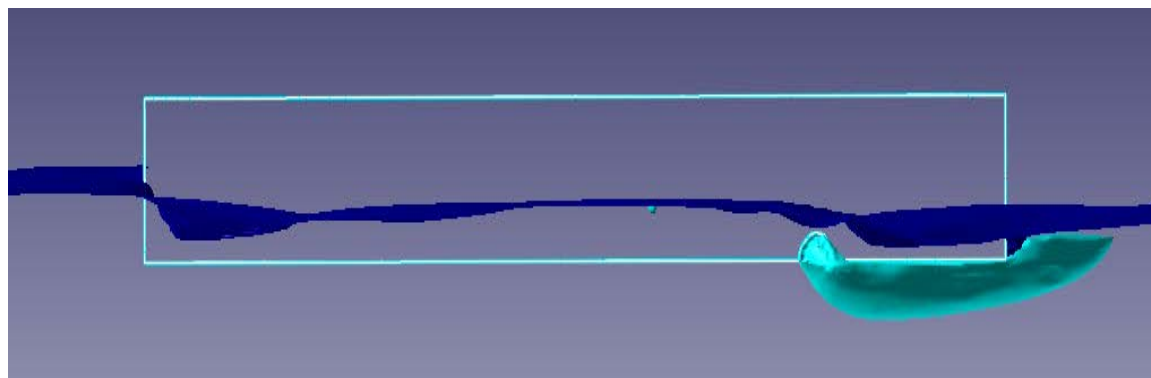


Рисунок 5.11 – Візуалізація утворення повітряного змащення
за сходинкою з профільованої виїмки

За результатами розрахунків була побудована таблиця 5.3, в якій наведено вплив сходинки та виїмки зі змащенням та без нього.

Таблиця 5.3

Результати дослідження опору погано обтічного тіла

v , м/с	Гладке тіло, [кН]	Тіло зі сходинкою без змащення, [кН]	Тіло з виїмкою без змащення, [кН]	Тіло зі сходинкою з змащенням, [кН]	Тіло зі виїмкою з змащенням, [кН]
6	18,691	19,511	17,193	17,585	15,347

На отриманих картинах візуалізації розподілу тиску спостерігається, що на частині, де утворилось повітряне змащення за сходинкою та за профільованою виїмкою, тиск та швидкість знижуються (рис. 5.12 – 5.13).

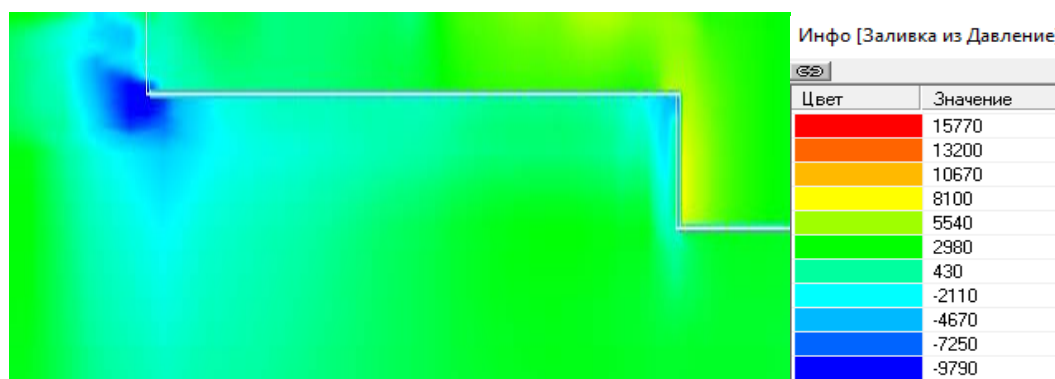


Рисунок 5.12 – Візуалізація розподілу тиску після сходинки

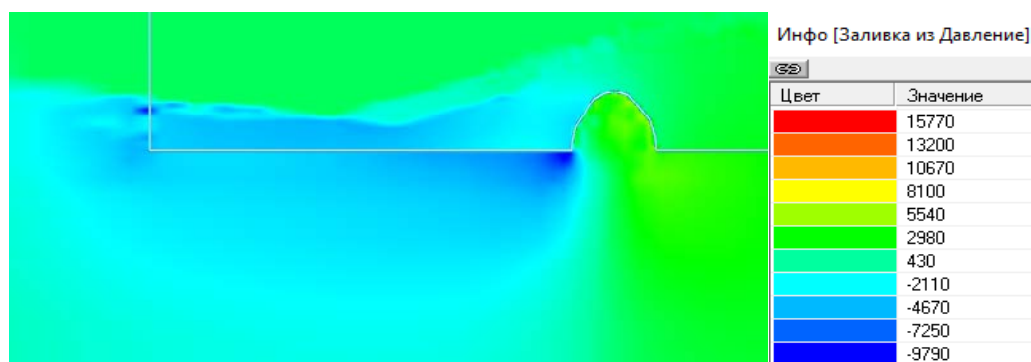


Рисунок 5.13 – Візуалізація розподілу тиску після виїмки

Аналіз отриманих результатів. Дослідження погано обтічного тіла з подачею повітряного змащення представляє собою перехідний етап для дослідження корпусу

судна з повітряним змащенням. За результатами розрахунків, з чотирьох варіантів найкращий результат показала профільована виїмка на днищевій поверхні погано обтічного тіла, з якої подавалося повітряне змащення. В результаті такого поєднання опір руху води до тіла знизився на 17%.

5.3 Зниження опору води під час руху швидкісного судна за рахунок подачі повітря на днищеву поверхню

Перспективність використання методу повітряного змащення для зменшення опору суден була метою дослідження протягом багатьох років [94, 95]. Проте, виникає досить вагома проблема для подальшого розвитку даного методу. Вона полягає у тому, що для подачі повітря необхідна енергія має досить велике значення, приблизно 2-8% від загальної, що споживається судном. Кількість енергії залежить від розмірів бульбашок та від глибини їх подачі. В результаті, потужність, затрачена на подачу повітря, зводить нанівець економію, яку здобули за рахунок зниження опору.

Для подачі повітря на деяку глибину необхідно витратити енергію, яка в себе включає: енергію адіабатичного стиснення, енергію, витрачену на подачу бульбашок необхідного розміру, та механічні витрати енергії в компресорі. Прорахуймо теоретичні витрати енергії через адіабатичне стиснення повітря. З термодинаміки відомо [95], що:

$$\Delta U = c_v T + RT, \quad (5.3)$$

де c_v – теплоємність при постійному об'ємі ($c_v = 718 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}$), R – газова стала ($R = 287 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{K}^{-1}$), T – температура (20°C). Затрачена робота має наступний вид:

$$L_t = R \left(\frac{K}{K-1} \right) T, \quad (5.4)$$

де K – коефіцієнт теплоємності ($K=1,4$). Відношення збільшення внутрішньої енергії ΔU до роботи, затраченої при адіабатичному стисненні повітря L_t , має наступний вид:

$$\frac{\Delta U}{L_t} = \frac{c_v}{R} \left(\frac{K-1}{K} \right). \quad (5.5)$$

З цього випливає, що витрати енергії через адіабатичне стиснення повітря складають приблизно 70%, а загальна чиста економія енергії за рахунок методу повітряного мастила знижується до 1-5%.

Тому пропонується використовувати даний метод без встановлення спеціальних нагнітальних станцій, а використовувати природний перепад тиску, атмосферного відносно до пониженого на дні судна.

В режимі глісування при русі судна відбувається удар води об днище, який розділяється на два потоки. Основний потік переміщується до кормової частини, а інший утворює тонку пелену бризок, які викидаються уперед. В точці C (рис. 3.19), відбувається роздвоєння потоку від удару води об поверхню судна, швидкість в даній точці вже дорівнює 0, а уся енергія набігаючого потоку перетворюється у гідродинамічний тиск P , який пропорціональний квадрату швидкості судна і масової щільності води ρ , тобто:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (5.6)$$

де $\rho = 102 \text{ кг-см}^2/\text{м}^4$; v – м/сек. За цією точкою тиск стає негативним і його величина залежить від кута атаки, швидкості набігаючого потоку, від повздовжнього профілю днища. Для того, щоб використати різницю даного тиску і атмосферного тиску для подачі повітря на дно судна, треба виконувати наступну умову:

$$\Delta P = C_p \frac{1}{2} \rho v^2 \geq (\rho - \rho_{\text{повіт}}) g H \cong \rho g H, \quad (5.7)$$

де C_p , ρ , $\rho_{\text{повіт}}$, g та H – коефіцієнт негативного тиску судна, щільність води, щільність повітря, швидкість вільного падіння та висота труби, по якій подається повітря на дно судна. З даного рівняння можна отримати швидкість, при якій буде подаватися повітря без застосування допоміжних пристроїв:

$$v = v_{\pi} \quad (5.8)$$

$$v_{\pi} = \sqrt{\frac{2gH}{C_p}}. \quad (5.9)$$

Таким чином, при досягненні даної швидкості та перевищенні її повітря буде поступати по трубах на днищеву поверхню корпусу природним чином через перепад тиску.

Для дослідження даного методу зниження опору використовувалась модель швидкісного катеру "Мерлин". Твердотільні моделі корпусів швидкісних суден створювалися в CAD системі SolidWorks (рис. 5.14) и мають характеристики, які наведені в таблиці 5.4.

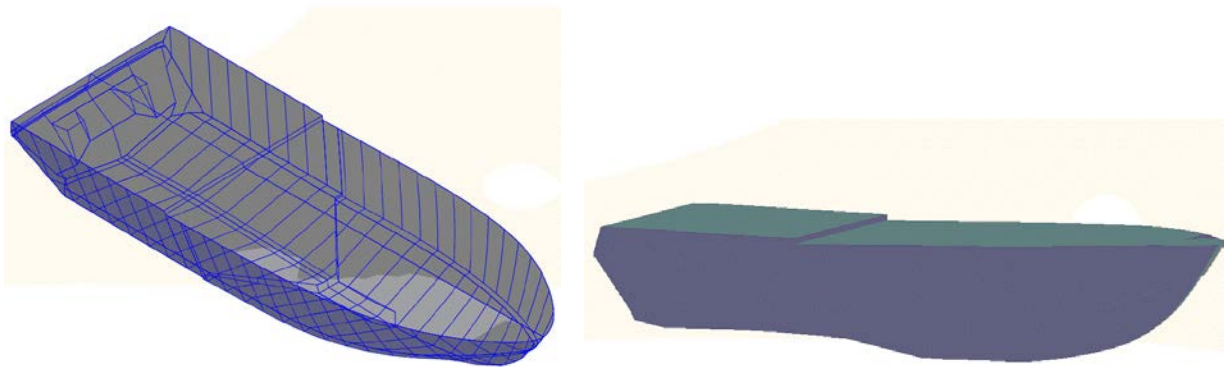


Рисунок 5.14 – Твердотільна модель швидкісного катеру "Мерлин"

Таблиця 5.4

Основні характеристики поверхні корпусу катеру "Мерлин"

Найбільша довжина судна	$L_{\text{нб}} = 12,27 \text{ м}$
Висота борту судна	$H = 1,777 \text{ м}$
Ширина судна	$B = 3,2 \text{ м}$
Осадка судна	$d = 0,5 \text{ м}$

Теоретичне креслення швидкісного катеру «Мерлин» представлено на рис. 5.15.

Рисунок 5.15 – Теоретичне креслення швидкісного катеру «Мерлін»»

Обрана модель досліджувалася у двох CFD пакетах: Flow Vision та Flow Simulation. Спочатку проводилися розрахунки для чистої моделі (рис.5.16 – 5.17).

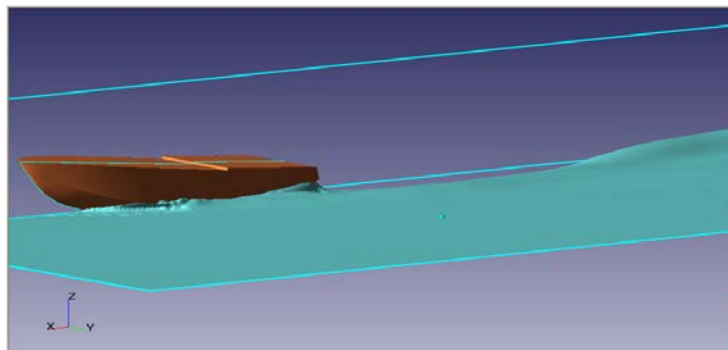


Рисунок 5.16 – Утворення хвильової поверхні при дослідженні первинного корпусу

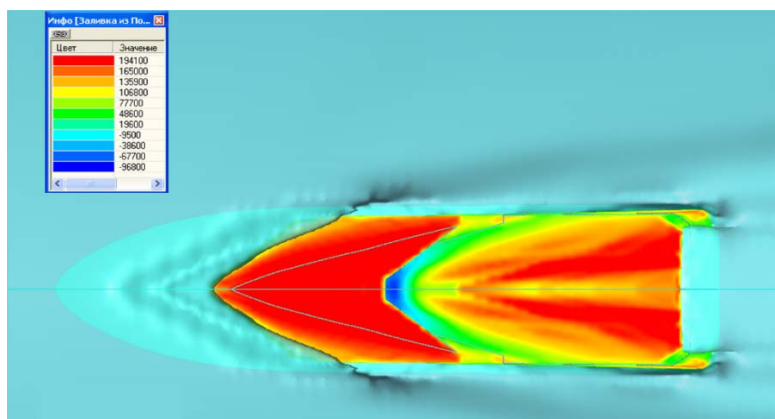


Рисунок 5.17 – Розподіл тиску по змоченій поверхні днища

Дослідження показали, що за реданом утворюється зона зниженого тиску, з суттєвим розрідженням і якщо в цю зону подати трубки, які будуть подавати повітря з атмосфери, тоді утвориться природна подача повітря за рахунок різниці тиску. Ми пропонуємо встановити трубки, конструкція яких зображена на рисунку 5.18.

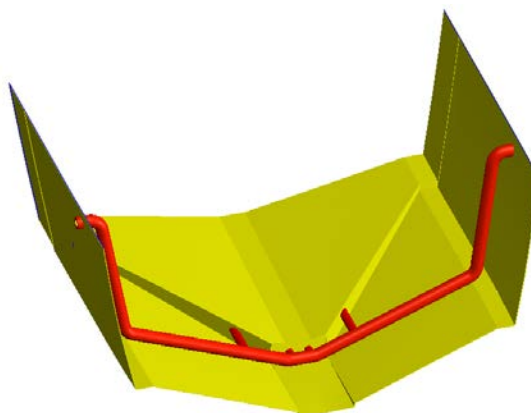


Рисунок 5.18 – Схема встановлення трубки подачі повітря в зареданий простір

Для даного катеру було виконано модельне дослідження в дослідницькому басейні (рис. 5.19 – 5.20) представниками Національного Університету кораблебудування ім. адмірала Макарова [96]. Встановлення скулових ніш не дало позитивного результату, тому що ця зона не має суттєвої різниці з атмосферним тиском, що видно на рисунку 5.17.

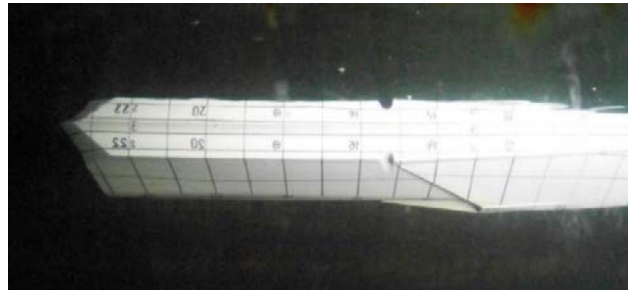


Рисунок 5.19 – Фотографія днища моделі при $v = 0$ м/с з скуловою нішею [96]



Рисунок 5.20 – Фотографія днища моделі при $v = 5$ м/с з подачею повітря в зареданий простір [96]

В процесі дослідження первинної моделі катера її форма зазнала багато змін, які включають встановлення одного та двох реданів, трансформацію форми редану від порогової до стріловидної з різними кутами загострення, зміна розташування каналів подачі повітря в зареданий простір, зміна кривизни несучих поверхонь, поєднання днища з бортами, встановлення днищевих інтерцепторів тощо. На рис. 5.21 [96] представлений основний результат дослідження. Виконані трансформування форми днища катера дозволили досягти результату: при зачинених каналах подачі повітря до зареданного простору крива буксирувального опору катера є аналогічною кривій опору катера типу "Deer-V", відчинення каналів природної подачі повітря до

зареданного простору призводить до суттєвих змін – катер стає глісуючим зі зменшенням опору на розрахунковій швидкості 45 вузлів у 2,6 разів.

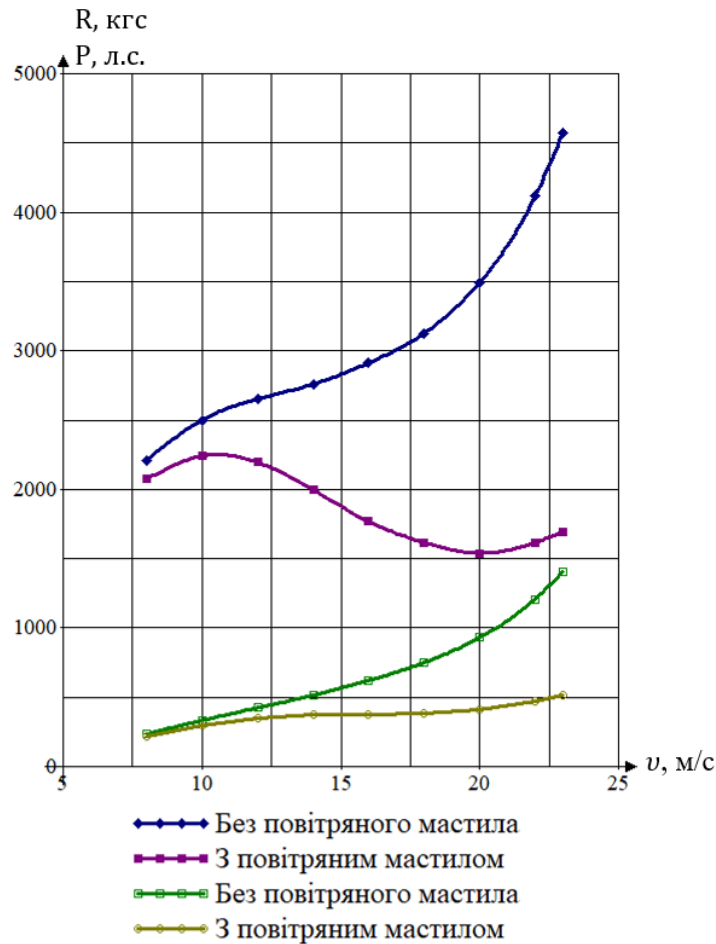


Рисунок 5.21 – Графік залежності буксирного опору та буксировочної потужності від швидкості катера типу "Deer-V" зі стріловидним днищевим реданом та кормовим інтерцептором при зачинених та відчинених каналах природної подачі повітря до зареданного простору [96]

Наступним етапом в 3D моделі були добудовані труби та виконувались розрахунки двох типів: з примусовою подачею повітря та з використанням ефекту від перепаду тиску (природна подача повітря). Усі розрахунки моделей виконувались в однакових умовах та при однакових швидкостях. В випадку розрахунків катеру зі встановленими трубами було виконано локальне подрібнення сітки в районі труб. За результатами розрахунків був побудований графік залежності опору від швидкості (рис. 5.22).

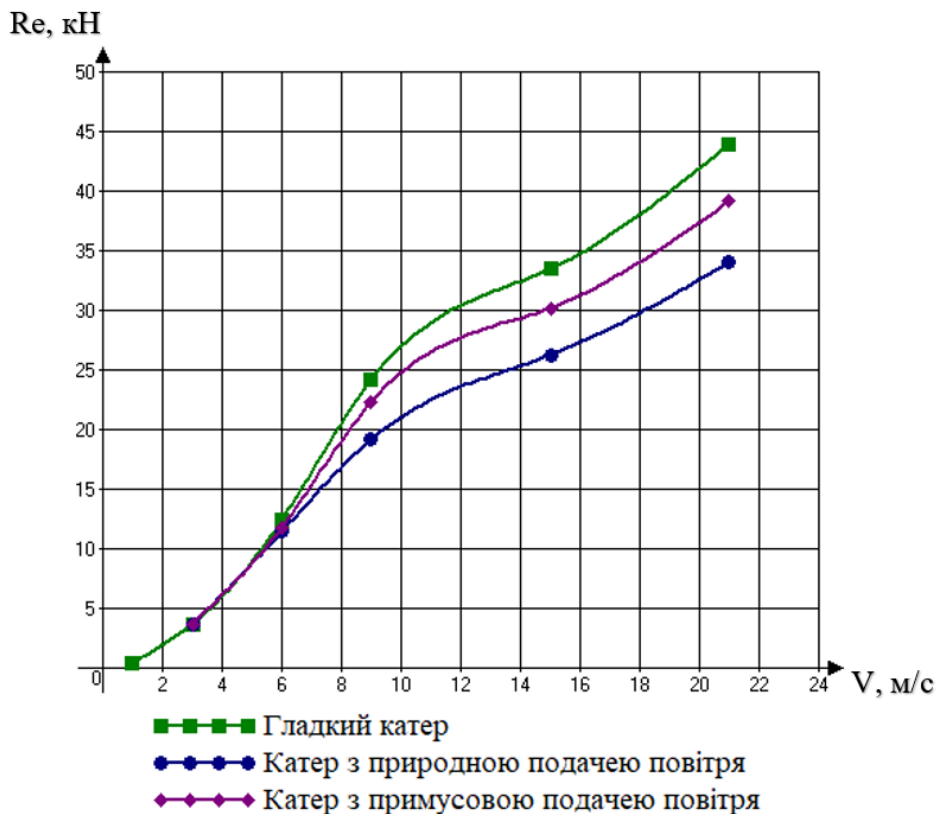


Рисунок 5.22 – Графік залежності опору від швидкості катеру "Мерлін"

З графіку видно, що за рахунок природної подачі повітря опір судна знижується від 10-20% в залежності від швидкості руху. Також слід зазначити, що примусова подача повітря з точки зору зниження опору може бути більш ефективною при більшій інтенсивності подачі повітря, однак при врахуванні потужності, витраченої на подачу повітря, уся економія буде зводитись нанівець. На візуалізації моделі видно, як були встановлені труби і як з них виходить повітря (рис. 5.23).

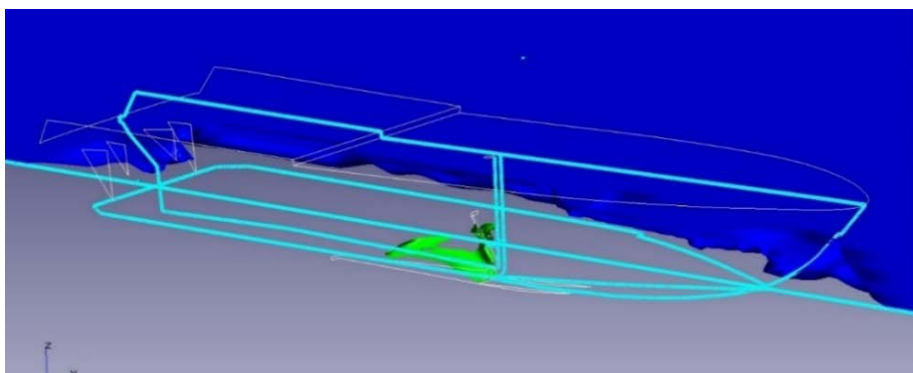


Рисунок 5.23 – Візуалізація швидкісного катеру "Мерлін" з подачею повітря по встановлених трубах

На зображеннях з векторами швидкості можна спостерігати зміну руху рідини при подачі повітря (рис. 5.24 – 5.25).

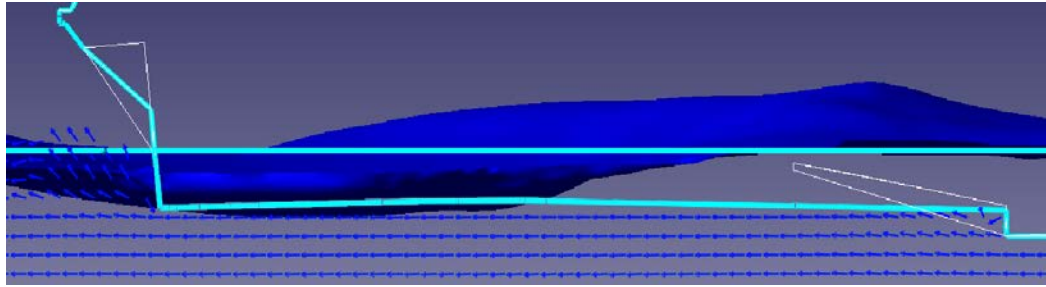


Рисунок 5.24 – Рух рідини вздовж днищеві поверхні катера

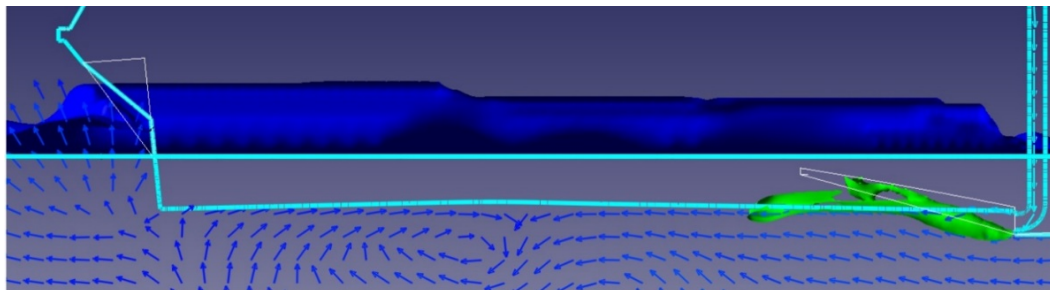


Рисунок 5.25 – Рух рідини вздовж днища при подачі повітря

Аналіз отриманих результатів. Для дослідження ефективності повітряного змащення на днищевій поверхні швидкісного катера виконувались два типи розрахунків: з примусовою подачею повітря, імітуючи роботу нагнітального обладнання, та з природною подачею повітря, за рахунок різниці атмосферного тиску і тиску на днищі судна. Розрахунки показали, що за рахунок природної подачі повітря опір судна знижується на 10-20% в залежності від швидкості ходу.

5.4 Прибутковість використання методу

Сучасне судно – складний об'єкт, в якому поєднуються практично всі напрямки та нові досягнення науки та техніки. Найбільш характерною особливістю процесу проектування є постійний пошук компромісних рішень, забезпечуючи досягнення найбільшої ефективності судна та виконання багатьох та суперечливих вимог до його якості. На сьогоднішній день в умовах постійної конкуренції судновласників головною ціллю при проектуванні судна для суднохідних компаній є отримання

доходу, хоча ефективність судна оцінюється також і за іншими економічними показниками [97-99].

Доходи від експлуатації судна на конкретній лінії розраховуються за наступною формулою:

$$PV = \sum_j [R_j P_j(v_j)^{\tau_j(v_j)} + R_j P_{1j}(v_{1j}) \tau_{1j}(v_{1j})], \quad (5.10)$$

де j – індекс рейсу; $P(v)$ і $P(v_1)$ – кількість перевозимого за рейс вантажу відповідно у прямому та зворотному напрямку; v – питома вантажна кубатура вантажу; v_1 – в зворотному напрямку; $\tau(v)$ і $\tau_1(v_1)$ – тариф за перевезення 1 т вантажу відповідно у прямому та зворотному напрямку; змінна $\tau(v)$ – коливається і розподілена за законом умовної густини (в залежності від v).

Кількість перевозимого за рейс вантажу визначається з умови:

$$P_j(v_j) = \min \left(P, \frac{W}{v_j}, P_j^* \right), \quad (5.11)$$

де P – специфікована вантажопідємність судна; W – місткість вантажних приміщень; P^* – партійність перевезень.

Відповідно у зворотному напрямку рейсу:

$$P_{1j}(v_{1j}) = \min \left(P, \frac{W}{v_{1j}}, P_{1j}^* \right). \quad (5.12)$$

Розрахункова швидкість судна в кожному напрямку рейсу визначається з урахуванням завантаженості судна:

$$v_{sj} = v_s \left(\frac{D}{D - P + P_{1j}(v_j)} \right)^{2/9}, \quad (5.13)$$

де v_s – специфікована швидкість судна; D – водотоннажність судна.

Тривалість ходового часу у прямому напрямку рейсу:

$$a_j = \frac{L_j}{24(v_{sj} - \Delta v_j)}, \quad (5.14)$$

де L_j – протяжність лінії; Δv_j – втрата швидкості в експлуатаційних умовах. Для зворотного напрямку аналогічним чином визначається зміна a_{1j} .

Час стоянки в порту:

$$\beta_j = \frac{P_j(v_j)}{H_{1j}} + \frac{P_{1j}(v_{1j})}{H_{2j}} + \bar{\beta}_j, \quad (5.15)$$

де H_1 – інтенсивність вантажних робіт яка залежить від особливостей грузу, який в першому наближенні можна оцінювати питомою вантажною кубатурою вантажу; H_2 – інтенсивність розвантажувальних робіт; $\bar{\beta}$ – кількість діб простою судна без вантажних операцій.

Сумарна тривалість j – рейсу судна визначається сумою:

$$a_j + a_{1j} + \beta_j + \beta_{1j}, \quad (5.16)$$

Експлуатаційні витрати судна за рік:

$$C_{\text{суд}} = C_{\text{ам}} + C_{\text{рем}} + C_{\text{мтп}} + C_{\text{ек}} + C_{\text{нав}} + C_{\text{зб}} + C_{\text{п}}, \quad (5.17)$$

де $C_{\text{ам}}$ – амортизаційні відрахування встановлюються у відсотках від вартості судна і диференційовані за типами суден і суднової силової установки; $C_{\text{рем}}$ – витрати на поточний ремонт; $C_{\text{мтп}}$ – витрати на матеріально-технічне постачання судна встановлено в розмірі $2,0 \div 2,5\%$ на рік від вартості судна; $C_{\text{ек}}$ – витрати на утримання екіпажу; $C_{\text{нав}}$ – навігаційні витрати містять витрати на агентування в портах, вартість навігаційного інструменту, постачання прісною водою, витрати на зв'язок і представників; $C_{\text{зб}}$ – витрати на загальні суднові збори в портах заходу за календарний рік експлуатації судна; $C_{\text{п}}$ – витрати на паливо.

У статтю витрат на паливо входить вартість палива і мастила, необхідних для здійснення судном рейсів за рік. Вартість палива визначається окремо на ходу і на стоянці:

$$C_{\text{п}} = C_{\text{ход}} + C_{\text{ст}}. \quad (5.18)$$

Витрати на паливо на стоянці визначаються в залежності від ціни дизельного палива:

$$C_{\text{ст}} = K_{\text{зап}} \cdot K_{\text{м}} \cdot Q_{\text{ст}} \cdot \text{Ц}_{\text{дп}} \cdot T_{\text{ст}}, \quad (5.19)$$

де $Q_{\text{ст}}$ – витрата палива на стоянці $2 \div 5$ т на добу можна прийняти в залежності від величини контейнеровместимості судна; $\Pi_{\text{дп}}$ – оптова ціна однієї тони дизельного палива; $T_{\text{ст}}$ – час стоянки за рік.

Витрати на паливо на ходу визначаються виходячи з питомих норм витрат і ціни однієї тони суднового мазуту:

$$C_{\text{ход}} = K_{\text{зап}} \cdot K_{\text{м}} \cdot Q_{\text{ход}} \cdot \Pi_{\text{пм}} \cdot T_{\text{х}}, \quad (5.20)$$

де $K_{\text{зап}}$ – коефіцієнт запасу, дорівнює $1,1 \div 1,2$; $K_{\text{м}} = 1,07$ – коефіцієнт, що враховує витрату мастила; $\Pi_{\text{пм}}$ – оптова ціна однієї тони суднового палива (мазуту).

Ходовий час судна за рік, доба:

$$T_{\text{х}} = t_{\text{х}} \cdot r_{\text{р}}, \quad (5.21)$$

де $t_{\text{х}}$ – ходовий час за один рейс судна, доба; $r_{\text{р}}$ – кількість рейсів судна за рік.

Витрата палива на добу на ходу, тон:

$$Q_{\text{ход}} = 24 \cdot q_{\text{п}} \cdot N_{\text{гд}} \cdot 10^{-6}, \quad (5.22)$$

де $q_{\text{п}}$ – питома витрата палива, г / на кВт на годину; $N_{\text{гд}}$ – потужність головного двигуна, кВт.

Використання способу регулювання розподілу тиску на змоченій поверхні судна зменшує опір судна та впливає на зменшення витрат на паливо наступним чином. Повний опір руху судна визначається як сума окремих складових:

$$R = R_{\text{ф}} + R_{\text{т}} + R_{\text{в}} + R_{\text{вч}} + R_{\text{пов}}. \quad (5.23)$$

Цей опір називають буксирувальним, так як він дорівнює зусиллю в тросі, що виникає при буксируванні судна. Потужність, необхідна для буксирування судна зі швидкістю v , називається буксирувальною потужністю (кВт):

$$EPS = \frac{R \cdot v}{102}, \quad (5.24)$$

де R – повний опір, Н; v – швидкість судна, м/с.

Потужність на фланці головного двигуна більше буксирувальної, так як при її визначенні необхідно враховувати пропульсивний коефіцієнт η ($\eta = \eta_{\text{р}} \eta_{\text{к}}$, де $\eta_{\text{р}}$ – коефіцієнт корисної дії рушія, а $\eta_{\text{к}}$ – коефіцієнт впливу корпусу), ККД редуктора $\eta_{\text{ред}}$,

ККД валопровода η_v (опорних і упорних підшипників) або інших спеціальних передач:

$$N_e = \frac{EPS}{\eta\eta_{ред}\eta_v}. \quad (5.25)$$

Не менш важливим аспектом є врахування кількості витрат і швидкості повернення витрачених коштів при модернізації судна одним з методів зниження опору [100]. Вартість об'єкту після модернізації визначається за формулою, у.о.:

$$K_{посл} = K_{до} + K_{вм}, \quad (5.26)$$

де $K_{до}$ – балансова вартість до модернізації; $K_{м}$ – витрати на модернізацію, які визначаються:

$$K_{вм} = (C_{тр} \cdot T + K_{п} + K_{млт}) \cdot k_{пр} \cdot k_p, \quad (5.27)$$

де $C_{тр}$ – вимірювач витрат на одиницю трудоємності, у.о.; T – трудоємність роботи по модернізації, люд. год.; $K_{п}$ – вартість встановленого обладнання отриманого за контрагентними поставками, у.о.; $K_{млт}$ – вартість основних матеріалів і додаткових компонентів, що вимагаються для основних елементів, виготовлення вузлів, у.о.; $k_{пр}$ – коефіцієнт що враховує витрати на підготовчі та здавальні роботи, допоміжні матеріали, транспортно заготівельні, спеціальні, поза виробничі витрати і накопичення; k_p – коефіцієнт, що враховує районні умови проведення модернізації для конкретного басейну.

Економічний показник роботи об'єкта до та після введення модернізації характеризується собівартістю, тобто загальними експлуатаційними витратами на утримання модернізації в експлуатації на годину, які приходяться на витрати палива на годину після модернізації, $\frac{\text{у.о.}}{\text{тон. год}}$;

$$S_m = \frac{E_{заг}^m}{Q_{год}} \quad (5.28)$$

$$E_{заг}^m = E_z + E_{ін} + E_{ам} + E_p + E_{пр}, \quad (5.29)$$

де E_z – витрати на змащувальні матеріали, у.о.; $E_{ін}$ – витрати на матеріали і знос малоцінних предметів і швидко зношувального інвентарю, визначаємо в розмірі 0,2%

від будівельної вартості об'єкта, у.о; $E_{ам}$ – амортизаційні відрахування, у.о; E_p – витрати на поточний ремонт можна визначити по укрупнених нормативах у відсотках від його будівельної вартості, у.о; $E_{пр}$ – інші прямі витрати, складають 1,5% від суми витрат по попереднім чотирьом статтями, у.о.

Фондомісткість модернізації показує величину основних фондів, потрібних для здійснення виробничого процесу, а також оборотних фондів (запасу палива, запчастин, інвентарю та ін.), що припадають на витрати палива на годину після модернізації, розраховується за формулою, $\frac{у.о.}{тон. год}$;

$$f = \frac{K_m}{Q_{год}}, \quad (5.30)$$

де K_m – вартість модернізації.

Економічна ефективність та доцільність модернізації визначається за формулою терміну повернення витрат, рік:

$$t_{ок} = \frac{K_m}{(S_{до} - S_{після}) \cdot Q_{год}} < 5 \text{ років}, \quad (5.31)$$

де $S_{до}$, $S_{після}$ – собівартість до та після модернізації, $\frac{у.о.}{тон. год}$; $Q_{год}$ – витрати палива на годину після модернізації, тон. год. Модернізація судна буде доцільна, якщо термін повернення витрат на модернізацію з приростом прибутку не буде перевищувати 5 років.

Розмір річного економічного ефекту, одержуваного в результаті модернізації, визначаємо в порівнянні з судном до модернізації, у. о.:

$$E_{рік} = (S_{до} - S_{після}) \cdot Q_{год} - E_n^{нт} \cdot K_m, \quad (5.32)$$

де $E_n^{нт}$ – нормативний коефіцієнт порівняльної ефективності капіталовкладень на нову техніку.

Враховуючи усі вище перераховані аспекти можна сформулювати загальну схему алгоритму вибору засобів зниження опору руху під час проектування суден, які дають змогу зменшенню витрат палива і вартості перевезеного вантажу (пасажирів) та

терміну окупності витрат при впровадженні цих засобів на новому або вже введеному в експлуатацію судні, яка зображена на рисунку 5.26.

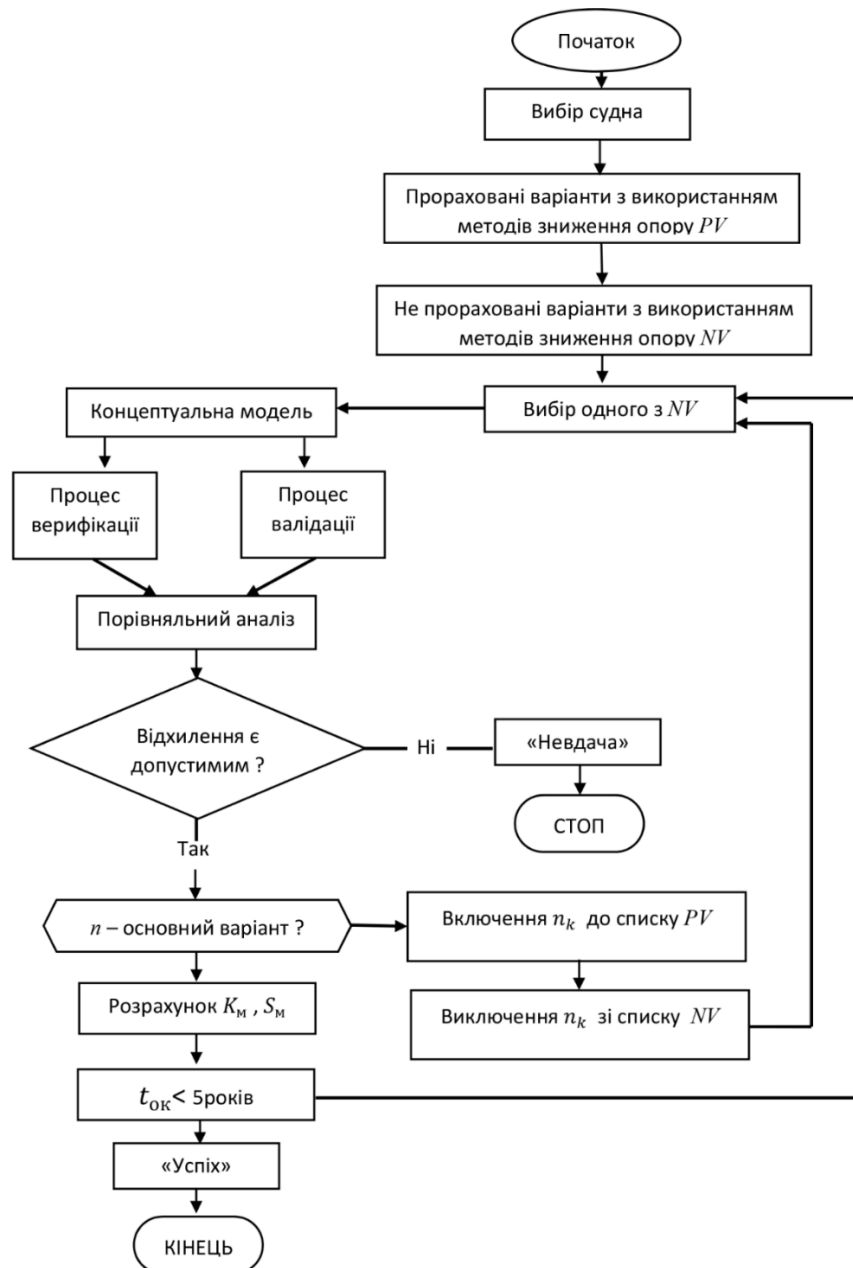


Рисунок 5.26 – Загальна схема алгоритму вибору засобів зниження опору руху під час проектування суден

Висновки по розділу 5. Узагальнюючи матеріали розділу, варто виділити наступні результати:

1. Досліджено вплив розмірів, форми, кількості і місця розташування виїмок на поверхні швидкісного катеру на опір його руху. Розрахунки показали, що існує певна

сукупність параметрів та місця розташування виїмок на змоченій поверхні цього судна яка дозволяє знизити його опір на 14%.

2. Досліджувалося зниження опору руху погано обтічного тіла (у вигляді паралелепіпеда) за допомогою подачі повітряного змащення за сходинкою та з виїмки на його підводну поверхню. Отримані результати показали можливість зниження опору, що обґрунтовує перспективність подальшого дослідження цього засобу.

3. Обґрунтована перспективність використання засобу подачі повітряного мастила для зниження опору швидкісного судна без застосування спеціальних нагнітальних приладів. Розрахунками в CFD комплексі FlowVision виявлено, що під час руху в рідині зареданного простору катеру «Мерлін» виникає зона суттєво зниженого тиску. Якщо з'єднати цю зону за допомогою спеціального каналу з атмосферою, то здійснюється природнє всмоктування повітряного мастила. Саме цей ефект підтверджено експериментально та розрахунками в CFD комплексі Flow Simulation.

4. Оцінку економічної ефективності методу зниження опору пропонується проводити з урахуванням зменшення витрат палива, що в свою чергу зменшує вартість перевезеного вантажу або пасажирів та терміну окупності витрат при впровадженні методу на новому або вже введеному в експлуатацію судні.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Набула подальшого розвитку технологія використання повітряного змащення для зниження опору руху швидкісних суден без застосування спеціальних приладів нагнітання повітря, яке подається лише за рахунок зниження тиску в зареданному просторі. Методами обчислювальної гідродинаміки доведено, що за рахунок природної подачі повітря опір судна знижується на 10-20% в залежності від швидкості руху при $Re = 1 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^8$.

- розроблена загальна схема алгоритму вибору засобів зниження опору руху під час проектування суден, які дають змогу зменшенню витрат палива і вартості

перевезеного вантажу (пасажирів) та терміну окупності витрат при впровадженні цих засобів на новому або вже введеному в експлуатацію судні.

Результати досліджень даного розділу наведено в таких публікаціях:

Bodnarchuk J. S., (2018), Stern profiled recess efficiency for reducing the water resistance of high-speed vessels / J. S. Bodnarchuk, Y. M. Korol // Shipbuilding and marine infrastructure, No.2 – pp. 107-110. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

Bodnarchuk J. S., (2019), Reducing poorly streamlined body water resistance by using active boundary layer control devices / J. S. Bodnarchuk // Shipbuilding and marine infrastructure, No.1 (11), pp. 4- 8.

Боднарчук Ю. С., (2018), Влияние локального регулятора распределения давления на различных поверхностях /Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// IX міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 319-320. *(здобувачу належить CFD моделювання впливу виїмки на різних поверхнях)*

Боднарчук Ю. С., (2019), Дослідження засобів зниження опору методами обчислювальної гідродинаміки / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// X міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 45-48. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків та співставлення отриманих розрахунків)*

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної задачі – зниженню опору суден за допомогою використання засобів керування прикордонним шаром.

Основні результати дисертаційної роботи:

1. Проведений параметричний аналіз конфігурацій виїмок на поверхні канонічних тіл (шар, циліндр та циліндричне тіло), результати розрахунків показали, що при правильному розташуванні та при виборі правильної форми виїмки можна знизити опір для розглянутих форм канонічних тіл, при певних умовах, від 5 до 20%, при цьому найвища ефективність при числах Рейнольдса $2 \cdot 10^7 \div 3 \cdot 10^7$.

2. Проведений аналіз ефективності встановлення специфічних виїмок на поверхнях суховантажного судна, танкера, швидкісного судна та підводних об'єктів за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу. При правильному виборі параметрів виїмок можна знизити опір даних типів суден від 2 до 20% для $Re=1,3 \cdot 10^8 \div 5 \cdot 10^8$ і якщо виїмки розташовані на відстані в 40% довжини судна починаючи з кормового перпендикуляру.

3. Доведена добра збіжність *CFD* моделювання з фізичним експериментом у науково-дослідницькому басейні, що показує їх дуже високу інформативність і достатню для практичного використання точність, також було виявлено, що ефект зниження опору руху моделей з виїмками не значний через малі числа Рейнольдса, експериментальні випробування варіантів виїмок показали зниження опору моделі надводного судна на 3% та підводного об'єкту на 2%;

4. Доведено, за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки, можливість використання повітряного змащення на швидкісних суднах без застосування механізмів примусового нагнітання повітря, а використовувати природній перепад тиску атмосферного до пониженого на дні судна при цьому опір судна знижується на 10-20% в залежності від швидкості ходу при $Re = 1 \cdot 10^7 \div 2 \cdot 10^8$.

Грунтуючись на економічних показниках була сформована загальна схема алгоритму вибору засобів зниження опору руху під час проектування суден, які дають

змогу зменшенню витрат палива і вартості перевезеного вантажу (пасажирів) та терміну окупності витрат при впровадженні цих засобів на новому або вже введеному в експлуатацію.

Враховуючи усі результати роботи було розроблено методику визначення можливості зниження опору руху об'єктів океанотехніки з встановленими місцевими особливостями в основу якої покладені методи обчислювальної гідродинаміки та параметричного аналізу.

Впровадження результатів.

1. Отримані результати дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі Національного Університету Кораблебудування імені адмірала Макарова під час лекцій, практичних і лабораторних занять по дисциплінах з теорії корабля та проектування суден.

2. Розробки схвалені у організації ООО «Артіль» ЛТД і будуть використовуватися в процесі конструювання, проектування і модернізації суден. Зокрема це розробка варіантів проекту пасажирського катамарану АВП24 класу ріка-море із звичайним корпусом та корпусом із виїмками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Scerra, M. (2020, April 16). Leading Shipbuilding Companies Worldwide: Gross Tonnage 2017. <https://www.statista.com/statistics/257865/leading-shipbuilding-companies-worldwide-based-on-volume/>
- [2] DailyTechInfo (2015). (n.d.). Retrieved from <https://dailytechinfo.org/auto/6806-mashiny-monstry-samsung-stroit-samoe-bolshoe-v-mire-sudno-paluba-kotorogo-budet-imet-ploshad-ravnuyu-chetyrem-futbolnym-polyam.html>
- [3] Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Global Website: Mhi Receives Order For "sayaendo" New-generation Lng Carrier From Mitsui O.s.k. Lines, 2012, No.1551 <http://www.mhi.com/news/story/1206291551.html>
- [4] Sendo Liner. (2019, November 06). (n.d.). Retrieved from <http://products.damen.com/en/ranges/eco-liner/eco-liner-1145>
- [5] Справочник по теории корабля. В 3 т. Т. 1: Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / Под ред. Я.И. Войткунского. - Л.: Судостроение, 1985. - 768 с.
- [6] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bulbous_Bow_NT.PNG
- [7] Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. - 2-е изд. - Л.: Судостроение, 1988. - 288 с.
- [8] <http://maritime-zone.com/news/air-cavity-system/>
- [9] А. М. Басин, А. И. Короткин, Л. Ф. Козлов. Управление пограничным слоем судна - Л.: Судостроение, 1999. - 492 с.
- [10] В.А. Лукашевский, Т.И. Банникова, Ю.М. Банников, М.Ю. Цейтлин. Исследование гидродинамических характеристик глиссирующих поверхностей с интерцепторами на задней кромке. Труды ЦАГИ, вып.1906, 1978.
- [11] Мавлюдов М., Садовников Ю., Титов В.,(2000), Интерцепторы, Журнал «КАТЕРА и ЯХТЫ», №170, ст. 12-18.

- [12] А.В. Пономарев. Применение автоматически управляемых интерцепторов на быстроходных судах различных типов. 2-я Международная конференция по быстроходным судам, Китай, 1992.
- [13] Ashish J.,(2009), Why Do Golf Balls Have So Many 'Dimples' On Them, Science ABC, www.scienceabc.com/sports/golf-balls-dimpled-reason-speed-air-aerodynamic-drag.html.
- [14] Chear C. K., Dol S. S., (2015), Vehicle Aerodynamics: Drag Reduction by Surface Dimples, International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, Vol:9, No:1.
- [15] Aoki K., Muto K., Okanaga H., Nakayama Y.,(2009), Aerodynamic characteristic and flow pattern on dimples structure of a sphere, 10th International Conference on Fluid Control, Measurements and Visualization, Moscow, Russia
- [16] Donnelly K. J.,(2009), Reduction of Ship Resistance through Induced Turbulent Boundary Layers, A thesis submitted to the Florida Institute of Technology, Melbourne, Florida, p. 1-74.
- [17] Biliotti, I., Brizzolara, S., Viviani, M., Vernengo, G., Ruscelli, D., Galliussi, M., Guadalupi, D. and Manfredini, A., (2011), Automatic Parametric Hull form Optimization of Fast Naval Vessels, 11th International Conference on Fast Sea Transportation, Honolulu, Hawaii, USA.
- [18] Gammon, M.A., (2011), Optimization of fishing vessels using a multi-objective genetic algorithm, Ocean Engineering, Vol. 38(10), p. 1054-1064.
- [19] Han, S., Lee, Y.S. and Choi, Y.B., (2012), Hydrodynamic hull form optimization using parametric models, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 17(1), p. 1-17
- [20] Guha A, Falzarano J., (2015), Application of multi objective genetic algorithm in ship hull optimization, Ocean Systems Engineering, Vol. 5 (2) ,91-107
- [21] Air cavity system news, Maritime Propulsion. (n.d.). Retrieved from <http://maritime-zone.com/news/air-cavity-system/>
- [22] Dong JinKim, Design of high-speed planing hulls for the improvement of resistance and seakeeping performance [Text] / Dong JinKim, Sun YoungKim, Young JunYou, Key

PyoRhee, Seong HwanKim, Yeon GyuKim // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. - Volume 5., March 2013,- P.161-177

[23] Rudow L., Hull Bottom Technology [Text] / Rudow L. // Journal BoatUS Magazin.-, April/May 2018,- P.11-12

[24] Чалов С. А., Исследование профилировки днища глиссирующих судов с искусственными кавернами, движущихся с повышенными скоростями хода[Text] / Чалов С. А. // Центральный научно-исследовательский институт имени академика Крылова Санкт-Петербург – С.200

[25] Jinho Jang, Experimental investigation of frictional resistance reduction with air layer on the hull bottom of a ship [Text] / Jinho Jang, Soon Ho Choi, Sung-Mok Ahn, Booki Kim, Jong Soo Seo // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. - Volume 6., June 2014,- P.363-379

[26] Simo A. Mäkiharju, Experimental investigation of frictional resistance reduction with air layer on the hull bottom of a ship [Text] / Simo A.Mäkiharju, Marc Perlin, Steven L.Ceccio // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. - Volume 4., December 2012,- P.412-422

[27] Shuji Mizokami, Experimental Study of Air Lubrication Method and Verification of Effects on Actual Hull by Means of Sea Trial[Text] / Shuji Mizokami, Chiharu Kawakita, Youchiro Kodan, Shinichi Takano, Seijiro Higasa, Ryosuke Shigenaga // Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 47., September 2010, - P. 3

[28] Ceccio, S.L., Mäkiharju, S.A., (2012), Air Lubrication Drag reduction on Great Lakes Ships, Great Lakes Maritime Research Institute.

[29] Greidanus A. J., Delfos R.,Westerwee J., (2011) , Drag reduction by surface treatment in turbulent Taylor-Couette flow, Journal of Physics: Conference Series 318

[30] Merkle, C.L. and Deutsch, S., (1989), Microbubble Drag Reduction. Frontiers in Experimental Fluid Mechanics, Vol. 46, p. 291-335

- [31] Mohanaragam K., Cheung S.C.P., Tu J.Y., Chen L., (2009), Numerical simulation of micro-bubble drag reduction using population balance model, *Ocean Engineering* 36 , p. 863–872
- [32] Winkel S. E., Ceccio S. L., Dowling D. R., Perlin M., (2004) , Bubble-size distributions produced by wall injection of air into flowing freshwater, saltwater and surfactant solutions, *Experiments in Fluids* 37 , p. 802–810
- [33] Legner, H.H., (1984), A simple model for gas bubble drag reduction, *Physics of Fluids*, Vol. 27 (12), p. 2788–2790
- [34] Purtell P., (2006), Final Technical Report for Assessments of Bubble Dynamics Model and Influential Parameters in Microbubble Drag Reduction, Florida International University, p. 1-36
- [35] Matveev I., Hydrodynamic modeling of semi-planing hulls with air cavities [Text] / I. Matveev // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. - Volume 7., May 2015,- P.500-508
- [36] Matveev K. I., (2014), Air-Ventilated Hulls, *Ocean Engineering*, Vol. 36, p. 930–940
- [37] Chambers L.D., Stokes K.R., Walsh F.C., (2006) ,Wood R.J.K., Modern approaches to marine antifouling coatings, *Surface & Coatings Technology* 201, p. 3642–3652
- [38] Demirel Y. K., Khorasanchi M.,(2013), Turan O., Incecik A., On the importance of antifouling coatings regarding ship resistance and powering, *Low Carbon Shipping Conference*, London, p. 1-14
- [39] Burcu Ünal, (2012), Effect of surface roughness on the turbulent boundary layer due to marine coating, *Istanbul Technical University*
- [40] Koch K., Barthlott W., (2009), Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: an inspiration for biomimetic materials, *Phil. Trans. R. Soc. A367*, p. 1487–1509
- [41] Castagna M., Mazellier N., Kourta A., (2017) Super-hydrophobic coating effects on the drag of a sphere, *23-eme Congrès Français de Mécanique*, p.1-20

- [42] Du P., Song D., Ren F., Xue Q., Hu H., (2017), Flow Characterizations and Drag Reduction on the Hydrophobic Surface with a Full Covering Gas Film, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 10, No. 2, pp. 491-498.
- [43] Bechert D.W., Hage W., (2006), Drag reduction with riblets in nature and engineering, Department of Turbulence Research, German Aerospace Center (DLR), Berlin, Germany., p.1-48
- [44] Bechert D.W. , Bruse M., Hage W., Meyer R., (2000), Fluid Mechanics of Biological Surfaces and their Technological Application, *Naturwissenschaften* 87, p. 157–171
- [45] Garcia-Mayoral R., Jimenez J., (2011), Drag reduction by riblets, *Phil. Trans. R. Soc.A369*, p. 1412–1427
- [46] В.А. Лукашевский, Т.И. Банникова, Ю.М. Банников, М.Ю. Цейтлин. Исследование гидродинамических характеристик глиссирующих поверхностей с интерцепторами на задней кромке. Труды ЦАГИ, вып.1906, 1978.
- [47] Karimi M. H., Seif M. S., Abbaspoor M., (2013), An experimental study of interceptor's effectiveness on hydrodynamic performance of high-speed planing crafts, *Sharif University of Technology, Iran*, Vol 20; pp. 21-29
- [48] Deng R., Huang D., Zhou G., Sun H., (2011), Preliminary Numerical Investigation of Effect of Interceptor on Ship Resistance, *National Natural Science Foundation of China*, p. 1-8
- [49] Ekman F., Naudo-Ribas C., Rydelius F., (2016), Model for Predicting Resistance and Running Attitude of High-Speed Craft Equipped with Interceptors, *Royal Institute of technology, Stockholm*, p. 1-43
- [50] Cooper C., (2011), An Experimental Study of Interceptors for Drag Reduction on High-Performance Sailing Yachts, *University of Strathclyde. Glasgow, Scotland*, p. 1-33
- [51] Gütekin AVCI A., Barlas B., Ölçer A. I., (2017), An Investigation of fuel efficiency in high speed vessels by using interceptors, *International Conference on Maritime Energy Management, World Maritime University, Malmö, Sweden*

- [52] Пономарев А.В.,(1992), Применение автоматически управляемых интерцепторов на быстроходных судах различных типов. 2-я Международная конференция по быстроходным судам, Китай.
- [53] Мавлюдов М., Садовников Ю., Титов В., (2000), Интерцепторы, Журнал «КАТЕРА и ЯХТЫ», №170, ст. 12-18.
- [54] PatSnap. “Golf Ball Aerodynamic Configuration.” Patent Report: | US10155135, patents.patsnap.com/v/US10155135-golf-ball-aerodynamic-configuration.html.
- [55] Chang-Hsien Tai, Chih-Yeh Chao, Jik-Chang Leong, Qing-Shan Hong, (2010), Effects of golf ball dimple configuration on aerodynamics, trajectory, and acoustics, National Ping-Tung University of Science and Technology, p. 1-11
- [56] Elyyan M.A., (2008), Heat Transfer Augmentation Surfaces Using Modified Dimples/Protrusions, Dissertation submitted to the faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Blacksburg, Virginia, p. 1-181
- [57] Pital H. C., Ranaware A. A., (2007), Heat Transfer Enhancement by Using Dimpled Surface, Journal of Mechanical and Civil Engineering, pp. 07-15
- [58] Chear C. K., Dol S. S., (2015), Vehicle Aerodynamics: Drag Reduction by Surface Dimples, International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, Vol:9, No:1.
- [59] Collins S., (2006), Rough around the edges, Journal Racecar Engineering, pp. 42-14.
- [60] Король Ю. М. Канонического вид общих уравнений движения твердых тел в жидкости [Текст] / Ю. М. Король, // Зб. наук.праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2010. – №5 (434). – С. 19 – 26.
- [61] SOLIDWORKS Flow Simulation 2018 Introduces Free Surface Simulation, The Javelin Blog, (2017), www.javelin-tech.com/blog/2017/09/free-surface-simulation-part-1/
- [62] Physics Simulations.” 2021 SOLIDWORKS Visualize Help - Physics Simulations, help.solidworks.com/2021/English/Visualize/c_combining_simple_and_complex_vehicle_simulations.htm?id=1ce7ff30c74443ba9feb6ac2b468ba5#Pg0.

- [63] Website designed and developed by Zarr - www.zarr.com. “Set Your Fluids Free.” Solid Solutions - SOLIDWORKS Pricing, Training & Support, www.solidolutions.co.uk/blog/2017/10/set-your-fluids-free/#.X32qGWgzaUk.
- [64] Rider, B., & Rider, B. (2017, December 28). Verification and Validation's Biggest Hurdle is an Honesty. Retrieved from <https://wjrider.wordpress.com/2017/12/22/verification-and-validations-biggest-hurdle-is-an-honest-assessment/#respond>
- [65] Система моделирования движения жидкости и газа Flow Vision, Москва: Изд-во «ТЕСИС», 1990-2009 – 305с.
- [66] Корпачев В. П. (2009), Теоретические основы водного транспорта леса /В. П. Корпачев// Сопротивление трения – Москва, pp. 117
- [67] Фарапонов В.В., (2012) Расчет аэродинамического коэффициента лобового сопротивления тела в дозвуковых и трансзвуковых режимах движения с помощью пакета ANSYS Fluent/ В. В. Фарапонов, Н. В. Савкинаа, А. С. Дьячковский, А. В. Чупашев// Компьютерные исследования и моделирование, Т. 4 № 4 - pp. 845–853
- [68] Katsumi Aoki, Koji Muto, Hiroo Okanaga and Yasuki Nakayama «Aerodynamic characteristic and flow pattern on dimples structure of a sphere»[text], Flucome 2009
- [69] Allroth J., (2013) A CFD Investigation of Sailing Yacht Transom Sterns/ J. Allroth, Ting-Hua Wu// Chalmers University of Technology – Sweden- pp. 5-6.
- [70] Tarasevich S.E., (2015) Hydrodynamics and Heat Transfer in Single-Phase Fluid Flows in Artificially Rough Pipes/ S. E. Tarasevich, A. V. Zlobin, and A. B. Yakovlev// Teplofizika Vysokikh Temperatur, Vol. 53, No. 6, pp. 909–911
- [71] Девнин, С. И. Силы, действующие на цилиндр малого удлинения [Текст] /С. И. Девнин//Аэрогидро- механика плохообтекаемых конструкций. – Л., 1983 – С. 101.
- [72] Administrator.(n.d.). Эксплуатационные качества малых судов. Retrieved from https://studwood.ru/1084892/tehnika/soprotivlenie_formy

- [73] Moonesun M., Korol Y.K., Dalayeli H.,(2015), CFD Analysis on the Bare Hull Form of Submarines for Minimizing the Resistance, International Journal of Maritime Technology, Tehran, Iran, Vol.3, p. 1-16.
- [74] M. Moonesun, Y.M. Korol, A. Brazhko, " CFD analysis on the equations of submarine stern shape", Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol.34, No.1, pp.21-32, 2015.
- [75] M.Moonesun, Yuri Mikhailovich Korol, Valeri A Nikrasov, Alexander Ursalov, Anna Brajhko, CFD analysis of the bow shapes of submarines, Journal of Scientific and Engineering Research, 2016, 3(1):1-16.
- [76] M.Moonesun, Asghar Mahdian, Yuri Mikhailovich Korol, Mehdi Dadkhah, Mehrshad Moshref Javadi, Anna Brazhko,Optimum L/D for Submarine Shape, Indian Journal of Geo-Marine Sciences, Vol. 45(1), January 2016, pp. 38-43
- [77] M.Moonesun, U.Korol ,Naval Submarine Body Form Design and Hydrodynamics-LAMBERT publication,2017, Germany.
- [78] Praveen P., Krishnankully P., (2013), Study on the effect of body length on the hydrodynamic performance of an axi-symmetric underwater vehicle, Indian Journal of Geo-Marine Sciences, Vol. 42, No. 8, pp.1013-1022
- [79] Vali, A., Saranjam, B., & Kamali, R. (2018). Experimental and Numerical Study of a Submarine and Propeller Behaviors in Submergence and Surface Conditions. Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 11, No. 5, 1297–1308.
- [80] Ahmadzade M., Moosavi M.,(2015), A Review on the Drag Reduction Methods of the Ship Hulls for Improving the Hydrodynamic Performance, International Journal of Maritime Technology, Tehran, Iran, Vol.4, p. 51-64.
- [81] Sebastian A., (2014), China's supersonic submarine, which could go from Shanghai to San Francisco in 100 minutes, creeps ever closer to reality, ExtremeTech.
- [82] Kukner A., Duran A., Cinar T.,(2016), Investigation of flow distribution around a submarine, Journal of Naval Science and Engineering , Vol. 12, No.2, pp.1-26

- [83] Testa C., Greco L.,(2018), Prediction of submarine scattered noise by the acoustic analogy, *Journal of Sound and Vibration*, Vol:426, pp. 186-218.
- [84] Wang L., (2017), Numerical Analysis of Wake Field over a Submarine with Full Appendages Based on STAR-CCM+, *International Conference on Materials Science and Engineering Application*, YiChang of HuBei, China.
- [85] Jaime D., Oscar D., (2014) Multiobjective Optimization of a Submarine Hull Design, *Ship science and technology*, Vol. 7, No.14.
- [86] Ходкость подводных лодок. (n.d.). Retrieved from <https://znatock.org/s14717t1.html>
- [87] Мунесан М. І. Засоби підвищення морехідних та експлуатаційних якостей підводних човнів: автореферат дисертації кандидата тех. наук : 05.08.03/ НУК, 2018. 28 с.
- [88] Dong JinKim, Design of high-speed planing hulls for the improvement of resistance and seakeeping performance [Текст] / Dong JinKim, Sun YoungKim, Young JunYou, Key PyoRhee, Seong HwanKim, Yeon GyuKim // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. - Volume 5., March 2013,- P.161-177
- [89] Devrim Bulent Danisman, An experimental study of the effect of change in LCG on resistance and planning capability of a fast vessel [Текст] / Devrim Bulent Danisman, Teksin Baris Bastug // *The 4th International Conference on Advanced Model Measurement Technology for the Maritime Industry*. - September 2015
- [90] Lawrence J., A Theoretical Study of the Optimal Dynaplane Vessel [Текст] / Lawrence J. // *The University of New South Wales Sydney*, - Australia 2009
- [91] Новака, Г.М. Эксплуатационные качества малых судов [Текст] / Г.М. Новака // *Справочник по катерам, лодкам и моторам*. – Л., 1982 - С. 85.
- [92] Каверны: пустоты в дне судна, или как это работает. (2017, November 16). Retrieved from <https://www.popmech.ru/technologies/394632-kaverny-pustoty-v-dne-sudna-ili-kak-eto-rabotaet/>

- [93] Amromin, E. (2016). Analysis of interaction between ship bottom air cavity and boundary layer. *Applied Ocean Research*, 59, 451-458. doi:10.1016/j.apor.2016.03.009
- [94] Air Lubrication Systems. (n.d.). Retrieved from <http://www.shipwright.biz/air-lubrication-systems>
- [94] Butterworth J. (2010) Experimental analysis of an air cavity concept applied on a ship hull to improve the hull resistance/ J/ Butterworth , M. Atlar, W. Shi // Newcastle University
- [95] Лазарев Е.А., (2010) Конспект лекций по агрегата наддува двигателей/Е.А. Лазарев, В.Е. Лазарев// Южно-Уральский государственный университет – Челябинск, - pp. 82-88
- [96] Некрасов В. А., (2020), Исследование ходкости реданых катеров с формой близких к типу «Деер-V» [Текст] / В. А. Некрасов, А. П. Ястреба// Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2020.–С. 34–35.
- [97] Нгуен Д.Т. ,(2013) Методика расчета технико-экономических показателей работы пассажирских судов, Retrieved from <http://www.jurnal.org/articles/2013/korabl1.html>
- [98] Administrator. (n.d.). Расчет запаса топлива для судового дизеля. Retrieved from <http://vdivzhke.ru/sudovye-dizelnye-ustanovki/toplivnaja-sistema-dizelnogo-dvigatelja/raschet-zapasa-topliva-dlja-sudovogo-dizelja.html>
- [99] Войлошников М.В., (2010) Модели оценки судов, активов морских предприятий и ресурсов океана, учебное пособие – pp. 87-110
- [100] Allroth J., (2013) A CFD Investigation of Sailing Yacht Transom Sterns/ J. Allroth, Ting-Hua Wu// Chalmers University of Technology – Sweden- pp. 5-6.

Додаток А

Список публікацій здобувача

1. Боднарчук Ю. С., (2013), Влияние лунок на аэрогидродинамическое сопротивление пластины, шара и кругового цилиндра / Ю. С. Боднарчук// Вісник НУК імені адмірала Макарова, №4, С. 7-13.
2. Боднарчук Ю. С., (2013), Эффективность кормовой профилированной выемки для снижения сопротивления воды движению судна / Ю. М. Король, Ю. С. Боднарчук// Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування, №4, С.21-24. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*
3. Bodnarchuk J. S., (2018), Stern profiled recess efficiency for reducing the water resistance of high-speed vessels / J. S. Bodnarchuk, Y. M. Korol// Shipbuilding and marine infrastructure, No.2 – pp. 107-110. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*
4. Bodnarchuk J. S., (2019), Reducing poorly streamlined body water resistance by using active boundary layer control devices / J. S. Bodnarchuk // Shipbuilding and marine infrastructure, No.1 (11), pp. 4- 8.
5. Боднарчук Ю. С., (2019), Розрахунок опору різної форми ватерлінії та ватерлінії зі встановленими виїмками на її поверхні методами обчислюваної гідродинаміки / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences, VII (24), pp-49-52. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*
6. Боднарчук Ю. С., (2020), Study of the influence of recesses on the resistance to the motion of submarines by methods of computational hydrodynamics/ Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король, М. І. Мунесан// Східно-Європейський журнал передових технологій,

№5 (107), pp.2-22. (здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)

Продовж. дод. А

1. Боднарчук Ю. С., (2013), Ефект лунки та її вплив на опір пласкої пластини / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// V науково-практична конференція всеукраїнського конкурсу наукових робіт – Миколаїв, С. 7-9. *(здобувачу належить участь у постановці задачі, проведення чисельних розрахунків, аналіз, обговорення та співставлення отриманих розрахунків)*

2. Боднарчук Ю. С., (2013), Моделирование активного управления пограничным слоем в CFD пакете Flow Vision / Ю. С. Боднарчук// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю – Миколаїв, С. 50-51.

3. Боднарчук Ю. С., (2013), Исследование эффективности кормовой профилированной выемки для снижения сопротивления судна / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// IV міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 405-406. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків та співставлення отриманих розрахунків)*

4. Боднарчук Ю. С., (2014), Снижение вязкостных составляющих сопротивления судна при помощи кормовых профилированных выемок / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю – Миколаїв, С. 8-9. *(здобувачу належить CFD моделювання руху судна з встановленими виїмками та параметричний аналіз характеристик виїмки)*

5. Боднарчук Ю. С., (2014), Зниження опору руху тіла за допомогою пристроїв активного керування прикордонним шаром / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// V міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 384-385. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків та співставлення отриманих розрахунків)*

6. Боднарчук Ю. С., (2018), CFD технологии в проблемах совершенствования элементов движительно-рулевого комплекса/ Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю– Миколаїв, С. 5-9. *(здобувачу належить розрахунки руху судна з встановленими виїмками)*

7. Боднарчук Ю. С., (2018), Влияние локального регулятора распределения давления на различных поверхностях /Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// IX міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 319-320. *(здобувачу належить CFD моделювання впливу виїмки на різних поверхнях)*

8. Боднарчук Ю. С., (2018), Зниження опору руху швидкісних суден за допомогою кормової профільованої виїмки/Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// Всеукраїнська науково-технічна конференція з міжнародною участю – Миколаїв, С. 27-28. *(здобувачу належить CFD моделювання руху швидкісного судна з встановленими виїмками та параметричний аналіз характеристик виїмки)*

9. Боднарчук Ю. С., (2019), Дослідження засобів зниження опору методами обчислювальної гідродинаміки / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// X міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 45-48. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків та співставлення отриманих розрахунків)*

10. Боднарчук Ю. С., (2019), Особливості вибору параметрів для верифікації та валідації розрахунків опору методами обчислювальної гідродинаміки / Ю. С. Боднарчук, Ю. М. Король// X міжнародна науково-технічна конференція НУК – Миколаїв, С. 41-44. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків та проведення верифікації та валідації розрахунків)*

11. Боднарчук Ю. С., (2019), Особливості вибору параметрів для верифікації та валідації розрахунків при використанні методів обчислювальної гідродинаміки/ Ю. С. Боднарчук// IV International Scientific and Practical Conference – Osaka, No.4, pp.-254 - 262. *(здобувачу належить проведення чисельних розрахунків канонічних тіл та співставлення отриманих розрахунків)*

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

12. Пат. 134146 Україна, МПК F15D 1/00 B63B 3/14. Спосіб регулювання розподілу тиску на змоченій поверхні судна / **Ю. С. Боднарчук**, Ю. М. Король – №201808745; заявл. 15.08.2018; опубл. 10.05.2019, Бюл. №9. – 4с.

Додаток Б

Методика визначення можливості зниження опору руху об'єктів океанотехніки з встановленими місцевими особливостями

1. Вибір об'єкта та побудова 3D моделі гладкого корпусу в зовнішній CAD системі, наприклад в SolidWorks. Для CFD пакета Flow Vision необхідно зберігати поверхню в форматах *.wrl, чи *.stl при подальшій роботі з ним. На відміну від Flow Vision, Flow Simulation не потребує експортувати модель до іншої програми, а просто переходимо у розділ Flow Simulation і починаємо створювати проект за допомогою команди "Wizard".

2. Створення розрахункового боксу, який представляє собою об'єм, в якому визначені рівні математичної моделі й границі об'єму, на яких визначені граничні умови. Для моделювання обтікання корпусу судна створюємо розрахункову область у вигляді паралелепіпеда. Розмір розрахункової області вибирається з міркувань мінімізації впливу зовнішніх граничних умов на картину обтікання корпусу. Якщо розглядається рух в необмеженій акваторії, то рекомендовані початкові розміри розрахункової області, які відносяться до характерних розмірів корпусу судна, вказані на рисунку 4.4 (розділ 4 ст. 70)

3. Експортувати розрахунковий бокс та поверхню гладкого корпусу для подальшого створення проекту.

4. Вибір параметрів моделювання, турбулентних компонентів, режиму руху, розрахункової речовини. Детальний алгоритм цих процесів приведений в пунктах 2.1 для Flow Vision та 2.2 для Flow Simulation. У випадку неправильному встановленні вище вказаних параметрів та не дотримання приведених алгоритмів, призведе до того, що результати розрахунків не будуть відповідати реальному світу.

5. Задаємо граничні умови на кордонах розрахункової області. Граничні умови (ГУ) задаються для кожної з розрахункових змінних. Щоб полегшити вибір і виключити постановку несумісних ГУ, вони об'єднанні у типи границь. Кожен з типів

відповідає певному фізичному процесу, який відбувається на кордоні. При дослідженні корпусів суден використовуються чотири ГУ, такі як: корпус, вхід, вихід та симетрія. На ГУ "Корпус" обираємо тип границі "Стенка". На ГУ "Вхід" обираємо тип границі "Вход / выход" – нормальна швидкість. На ГУ "Вихід" обираємо тип границі "Свободный выход" – нульовий тиск, нульовий потік. На ГУ "Симетрія" обираємо тип границі "Симметрия" – стінка з прослизанням (рисунок 4.12, розділ 4 ст.74).

6. Задаємо початкову сітку. Початкова сітка задається вздовж напрямів осей x , y , z . В нашому випадку сітку робимо більш густою в місцях перетину корпусу з рідиною. Для підвищення точності задається рівень адаптації по поверхні корпусу судна. В цьому випадку, усі клітки поблизу поверхні корпусу будуть зменшені до відповідного рівня.

7. Після виконання роботи з розрахунковою сіткою виконується перший розрахунок. Далі отриману сітку ще раз зменшують за допомогою зменшення сітки або підвищують ступінь адаптації сітки і виконується другий розрахунок. Отримані результати, які залежать від кількості ітерацій для різної густини загальної та локальної сітки порівнюються між собою. Якщо крива вирівнюється або коливання стали не значні та циклічні, у випадку дослідження вільної поверхні, можна зробити висновок, що отримана сітка є правильною і подальше зменшення розрахункової сітки перестане впливати на результат. Також слід відмітити якщо первину сітку одразу зробити дуже дрібною із високою ступеню адаптації, такий розрахунок займатиме багато часу або в гіршому випадку може призвести до аварійного припинення розрахунку.

8. Виконання двох видів розрахунків: без врахування вільної поверхні та з врахуванням вільної поверхні. У випадку дослідження підводного човна виконується один вид розрахунку так як в створені вільної поверхні немає необхідності. Ці розрахунки проводяться для подальшого порівняння з корпусами з місцевими особливостями.

9. Перевірка ітераційної збіжності розрахунків.

10. Аналіз отриманих результатів для гладкого корпусу судна.

11. Створення місцевих особливостей на поверхнях гладких корпусів.

а) Ґрунтуючись на результатах отриманих в даній дисертаційній роботі можна рекомендувати, як початкову точку дослідження, встановлення або поперечних специфічних виїмок каплеобразної форми з заокругленням 20, шириною 3% від довжини судна та максимальною глибиною 0,3м; або дві поперечні кругові виїмки з шириною 0,6м та глибиною 0,3м (рисунок 1). На підводних човнах слід використовувати кільцеві виїмки ширина яких становить 0,01 від діаметру самого човна, в кількості від 4 штук. У усіх випадках оптимальним місцем розташування виїмок є $\bar{l}_v = l_v / L_{\text{нб}} = 0,42$ – від довжини судна, починаючи з кормового перпендикуляру (l_v – місце встановлення виїмки від корми).

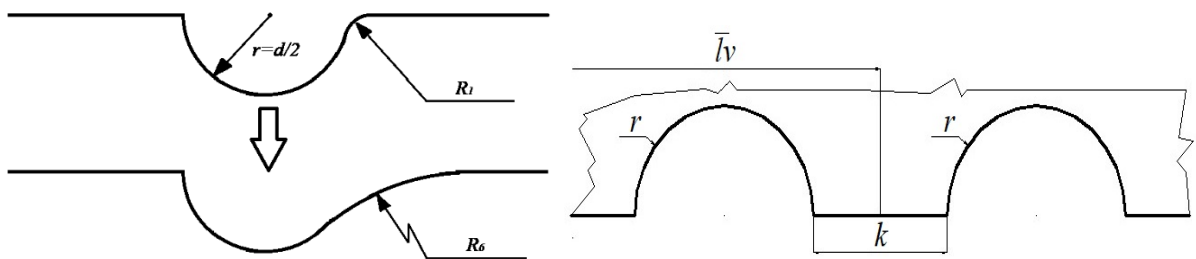


Рисунок 1 – Конструкція виїмки

Слід відзначити, що дані рекомендації є початковими оскільки для ефективності виїмок їх параметри та місце розташування залежать від умов обтікання корпусу, а саме від характеристик обводів та довжини корпусу судна. Тому оптимальні параметри виїмок є предметом дослідження даної методики.

б) У випадку використання повітряного змащення без застосування спеціальних нагнітальних станцій, а використовувати природній ефект подачі повітря, місцевими особливостями виступають трубки які сполучають атмосферне повітря з дном корпусу судна. Ґрунтуючись на результатах отриманих в даній дисертаційній роботі можна рекомендувати, встановлення не менше ніж дві трубки з поперечним

перерізом 0,06м в зону пониженого тиску, місце розташування якого виявляється з пункту 10 (Аналіз отриманих результатів для гладкого корпусу судна).

12. Експортування корпусів з місцевими особливостями в CFD пакет в проект з розрахунковим боксом у якому виконувався розрахунок гладкого корпусу. Цей процес виконується для унеможливлення механічних помилок та відповідності усіх умов при розрахунку усіх корпусів для коректного порівняння отриманих результатів.

13. Створення локального зменшення сітки в зоні встановлення місцевих особливостей корпусів. Якщо цього не робити тоді програма не зможе прорахувати процеси які відбуваються поблизу та в їх середині.

14. Виконання розрахунків корпусу з місцевими особливостями без врахування вільної поверхні. Цей вид розрахунок проводиться як попередній аналіз впливу виїмки на судно у зв'язку з досить довгим часом, який необхідний для розрахунку моделі з вільною поверхнею. У випадку дослідження підводного човна виконується один вид розрахунку так як в створені вільної поверхні немає необхідності.

15. Перевірка ітераційної збіжності розрахунків.

16. Аналіз отриманих результатів для корпусу з місцевими особливостями.

17. Порівняння результатів розрахунків для гладкого корпусу судна та для корпусу з місцевими особливостями. Для підводних човнів даний пункт є останнім у випадку позитивного результату при порівнянні (зниження опору за рахунок встановлення виїмок на поверхні підводного човна), у негативному результаті – необхідно повернутися до 11 пункту і виконати починаючи з нього усю методику змінивши при цьому параметри виїмок. Для звичайних корпусів у випадку позитивного результату при порівнянні (зниження опору за рахунок встановлення виїмок на поверхні корпусу судна), переходимо у наступний пункт. У разі негативного результату – необхідно повернутися до 11 пункту і виконати, починаючи з нього, усю методику змінивши при цьому параметри виїмок.

18. Виконання розрахунків корпусу з місцевими особливостями з врахуванням вільної поверхні.

19. Перевірка ітераційної збіжності розрахунків.

20. Аналіз отриманих результатів для корпусу з місцевими особливостями.

21. Порівняння результатів розрахунків для гладкого корпусу судна та для корпусу з місцевими особливостями. У випадку позитивного результату при порівнянні (зниження опору за рахунок встановлення виїмок на поверхні корпусу судна), даний пункт є останнім. У разі негативного результату – необхідно повернутися до 11 пункту і виконати, починаючи з нього, усю методику змінивши при цьому параметри виїмок.

ДОДАТОК
АКТИ ВПРОВАДЖЕНЬ І СХВАЛЕНЬ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

54025, м. Миколаїв, пр. Героїв України 9, тел./факс (0512) 42-42-80 E-mail: university@nuos.edu.ua№ 40/1358 від 30 09 2020

АКТ

Наступний акт складено в тому, що матеріали дисертації Боднарчук Юлії Сергіївни «Зниження опору суден за допомогою використання пристроїв активного керування прикордонним шаром» використовуються в навчальному процесі Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова при читанні лекцій з дисциплін «Теорія корабля», «Проектування суден та об'єктів океанотехніки», «Обчислювальна гідродинаміка». Зокрема це наступні теми:

- використання «Способу регулювання розподілу тиску на змоченій поверхні судна» (виїмок) на поверхнях суховантажних, швидкісних суден, танкерів та підводних човнів для зниження опору руху;
- технології CFD моделювання руху суден усіх типів з встановленими виїмками;
- використання повітряного мастила з природною подачею на поверхні швидкохідного судна для зниження опору руху.

З повагою,
Ректор



Є.І. Трушляков



Тел (0512) 50-05-35
Факс (0512) 50-06-77
E-mail: artel.pochta@gmail.com

*Вих. № 4 ВІСЬ
20.10.2020р.*

АКТ

м. Миколаїв

20.10.2020р.

Наступним актом стверджується, що матеріали дисертаційної роботи Боднарчук Юлії Сергіївни «Зниження опору суден за допомогою використання пристроїв активного керування прикордонним шаром» були застосовані при проектуванні суден в ООО «Артіль» ЛТД. Зокрема це розробка варіантів проекту пасажирського катамарану АВП 24 класу ріка-море із звичайним корпусом, та корпусом з виїмкою, яка згідно з розрахунками знижує опір руху на 10%.

Зараз здійснюється добудова головного судна із звичайним корпусом, а далі буде збудовано судно з виїмкою і будуть здійснені порівняльні ходові випробування.

Що стосується використання повітряного мастила як засобу зниження опору швидкохідних суден глісуючого типу, то матеріали дисертації Боднарчук Ю.С. також представляють певний інтерес для нашої організації і безумовно будуть використані при проектуванні та побудові таких суден в майбутньому.



Іванов Д.С.

Сертифікат



Цей сертифікат підтверджує, що

Боднарчук Юлія Сергіївна

приймав(ла) участь у роботі Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю

**СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЕКТУВАННЯ, ПОБУДОВИ, ЕКСПЛУАТАЦІЇ І РЕМОНТУ СУДЕН,
МОРСЬКИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ І ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД**

з доповіддю

**Особливості вибору параметрів для верифікації та валідації
розрахунків опору методами обчислювальної гідродинаміки**

Голова оргкомітету конференції,
директор Кораблебудівного інституту
Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова
к.т.н., доцент Бондаренко О.В.

23-24 травня 2019 р.
м. Миколаїв, Україна



Підпис

CERTIFICATE

is awarded to

Bondarchuk Julia

for being an active participant in
IV International Scientific and Practical Conference
“PERSPECTIVES OF WORLD SCIENCE
AND EDUCATION”



OSAKA

25-27 December 2019

sci-conf.com.ua



Сертифікат

Цей сертифікат підтверджує, що

Боднарчук Юлія Сергіївна

приймав(ла) участь у роботі Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю

**СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЕКТУВАННЯ, ПОБУДОВИ, ЕКСПЛУАТАЦІЇ І РЕМОНТУ СУДЕН,
МОРСЬКИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ І ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД**

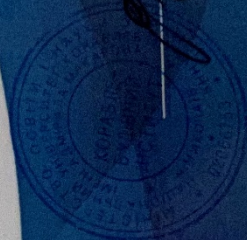
з доповіддю

*Дослідження засобів зниження опору
методами обчислювальної гідродинаміки*

Голова оргкомітету конференції,
директор Кораблебудівного інституту
Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова
к.т.н., доцент Бондаренко О.В.

23-24 травня 2019 р.
м. Миколаїв, Україна

Підпис





АМЕРИКАНО-УКРАЇНСЬКИЙ
МІЖНАРОДНИЙ ДОСЛІДНИЦЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ



INTERNATIONAL RESEARCH UNIVERSITY



ADVANT

CERTIFICATE

засвідчує, що

Олександр Богданчук

пройшов(ла) тренінг

«ЕФЕКТИВНІ ПЕРЕГОВОРИ»

за методиками спецслужб

(8 годин)

[Signature]

СЕРГІЙ СТУЖУК

President
International Research University

ОЛЕКСАНДРА КНЯЗЬОВА

Лідер
компанії ADVANT





(11) **134146**(19) **UA**(51) МПК (2019.01)
F15D 1/00
B63B 3/14 (2006.01)(21) Номер заявки: **u 2018 08745**(22) Дата подання заявки: **15.08.2018**(24) Дата, з якої є чинними
права на корисну модель: **10.05.2019**(46) Дата публікації відомостей
про видачу патенту та
номер бюлетеня: **10.05.2019,**
Бюл. № 9(72) Винахідники:
Король Юрій Михайлович,
UA,
Боднарчук Юлія Сергіївна,
UA(73) Власник:
НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ
АДМІРАЛА МАКАРОВА,
просп. Героїв України, 9, м.
Миколаїв, 54025, UA

(54) Назва корисної моделі:

СПОСІБ РЕГУЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ТИСКУ НА ЗМОЧЕНІЙ ПОВЕРХНІ СУДНА

(57) Формула корисної моделі:

Спосіб регулювання розподілу тиску на змоченій поверхні судна, що включає вкривання кормової змоченої поверхні судна сферичними виїмками, який **відрізняється** тим, що встановлюють одну або декілька поперечних виїмок на змоченій поверхні корпусу судна в залежності від характеристик форми корпусу, причому для кожного окремого судна процес знаходження оптимального розміру, місця розташування та форми виїмок виконують індивідуально у зв'язку з гідродинамічними особливостями процесу обтікання.

(11) 134146

<p align="center">Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент)</p>
<p>Оригіналом цього документа є електронний документ з відповідними реквізитами, у тому числі з накладеним електронним цифровим підписом уповноваженої особи Міністерства економічного розвитку і торгівлі України та сформованою позначкою часу.</p> <p>Ідентифікатор електронного документа 2217080519.</p> <p>Для отримання оригіналу документа необхідно:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Зайти до ІДС «Стан діловодства за заявками на винаходи та корисні моделі», яка розташована на сторінці http://base.uipv.org/searchInvStat/. 2. Виконати пошук за номером заявки. 3. У розділі «Документи Укрпатенту» поруч з реєстраційним номером документа натиснути кнопку «Завантажити оригінал» та ввести ідентифікатор електронного документа. <p align="center">Ідентичний за документарною інформацією та реквізитами паперовий примірник цього документа містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.</p> <p>Уповноважена особа Укрпатенту  І.Є. Матусевич</p> <p>10.05.2019 </p>

